

การพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสง
แบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

DEVELOPMENT OF A BULK MATERIAL VOLUME ESTIMATION
SYSTEM USING AUTOMATIC MOVING RAIL
LIDAR TECHNOLOGY



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Industrial Systems
and Environmental Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสง
แบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



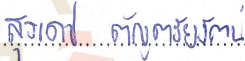
(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ปภากร พิทยवाल)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.สุรเดช ตัญตย์รัตน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(รศ. ดร.นิวิท เจริญใจ)

กรรมการ



(อ. ดร.ณัฐวัฒน์ พิณรัตน์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จිරนนท์ชัย ศรีทับ : การพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองด้วยเทคโนโลยีวัดระยะ
ด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ (DEVELOPMENT OF A BULK MATERIAL VOLUME
ESTIMATION SYSTEM USING AUTOMATIC MOVING RAIL LIDAR TECHNOLOGY)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากร พิทยชวล, 105 หน้า

คำสำคัญ: วัสดุเทกอง/การประเมินปริมาตร/เทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสง/ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเรื่อง การพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบที่ใช้ในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยใช้ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ และเสนอแนวทางการเพิ่มค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยการพัฒนาต้นแบบระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้าขึ้น และนำไปทดสอบกับวัสดุตัวอย่าง คือ แกลบแห้ง ในพื้นที่ปฏิบัติการขนาด 108 ลูกบาศก์เมตร กำหนดรูปแบบวัสดุเทกองเป็นทรงกรวย จำนวน 3 ขนาดที่มีปริมาตรต่างกัน ได้แก่ 1, 5 และ 10 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยใช้มุมสแกนของระบบอยู่ที่มุม 0, 45 และ 90 องศา และความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบเท่ากับ 2, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 เซนติเมตรต่อวินาที โดยทำการเก็บข้อมูลซ้ำจำนวน 3 ครั้ง และทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักทางสถิติ โดยการหาค่าเฉลี่ยและเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือระดับอุตสาหกรรม ในด้านค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล ต้นทุนค่าดำเนินงาน และความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน จากการวิจัยพบว่า ค่าความแม่นยำของการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองขนาด 5 ลูกบาศก์เมตรสูงสุด เท่ากับ 99.82% ที่มุมสแกน 90 องศา ด้วยความเร็ว 25 เซนติเมตรต่อวินาที การพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ จะทำให้ผู้ประกอบการโรงสีข้าว สามารถเพิ่มศักยภาพในการบริหารจัดการคลังเก็บสินค้าแบบเทกองได้ดีมากยิ่งขึ้น

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา..... *จिरนนท์ชัย ศรีทับ*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *ปภากร*

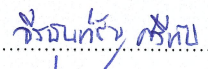
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... *สุวิดา ตันตยพงษ์*

CHIRANANCHAI SRITAP : DEVELOPMENT OF A BULK MATERIAL VOLUME ESTIMATION SYSTEM USING AUTOMATIC MOVING RAIL LIDAR TECHNOLOGY.
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PAPHAKORN PITAYACHAVA., Ph.D., 105 PP.

Keywords: Bulk material/Volume estimation/LiDAR technology/Point cloud data

This study focuses on developing a bulk material volume estimation system using automated moving rail optical distance measuring technology. The objective is to establish a system to estimate the volume of bulk materials in warehouses using three-dimensional point cloud data and to propose guidelines for increasing the accuracy of such estimations. A prototype system was developed and tested with dry rice husk. The experiment will take place in an area measuring 108 cubic meters. The bulk material was shaped conically in three sizes with volumes of 1, 5, and 10 cubic meters, respectively. The sensors scanned at angles of 0, 45, and 90 degrees, and the system operated at acceleration speeds of 2, 5, 10, 15, 20, 25, and 30 centimeters per second. Data collections were repeated 3 times and analyzed statistically, averaged, and compared with data obtained from industrial tools, focusing on accuracy, data retention period, operating costs, and safety. The research found that the maximum accuracy for estimating the volume of a 5 cubic meter bulk material was 99.82% at a scanning angle of 90 degrees with a speed of 25 centimeters per second. These findings indicate that rice mill operators can significantly enhance the management potential of bulk warehouses.

School of Industrial Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature..... 

Advisor's Signature..... 

Co-Advisor's Signature..... 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากร พิทยชวล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเดช ตัญตรีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้โอกาสทางการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และอบรมสั่งสอนเป็นอย่างดีเสมอมา ตลอดจนให้คำปรึกษาในการเขียนบทความทางวิชาการ วิทยานิพนธ์ และตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิฐ เจริญใจ และ อาจารย์ ดร.ณัฐวัฒน์ พิณรัตน์ คณะกรรมการ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ รวมไปถึงคณาจารย์และบุคลากรในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา และแนะนำการจัดเตรียมเอกสารสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการบริหารและเพื่อนร่วมงาน บริษัท ไอครีเอทีฟซิสเต็มส์ จำกัด ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะครูโรงเรียนหัวสะพาน ตำบลหินดาด อำเภอห้วยแถลง จังหวัดนครราชสีมา และโรงเรียนจักราชวิทยา ตำบลจักราช อำเภอจักราช จังหวัดนครราชสีมา ที่สั่งสอนให้ความรู้ และประสบการณ์ ตลอดจนการสนับสนุนด้านทุนการศึกษา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะ อบรมเลี้ยงดู สั่งสอน ตลอดจนการส่งเสริมด้านการศึกษาเป็นอย่างดีมาตลอด และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอมา

จิรนนท์ชัย ศรีทับ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 นิยามคำศัพท์.....	4
2 ปรัชญาวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ความแตกต่างและข้อจำกัดของการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองกลางแจ้งและในอาคาร.....	7
2.2 เครื่องมือในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง.....	15
2.3 วิธีประเมินปริมาตรด้วยเทคนิค 2.5D จากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ.....	28
2.4 ซอฟต์แวร์ในการประเมินปริมาตรจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ.....	31
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	37
3.1 กรอบการวิจัย.....	37
3.2 แนวคิดการออกแบบระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง.....	38
3.3 การสอบเทียบความแม่นยำระบบ.....	47
3.4 การออกแบบการทดลอง.....	49
3.5 วิธีการประเมินปริมาตร.....	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การสอบเทียบความแม่นยำ	60
4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	62
4.1 ผลการทดสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองของระบบ ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้.....	62
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสแกนเก็บข้อมูลของระบบกับค่าความแม่นยำในการ ประเมินปริมาตรกองวัสดุขนาดต่าง ๆ.....	68
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง	70
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตารางเก็บข้อมูลผลการทดลอง	83
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	105

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	คุณสมบัติของ Mini PC ยี่ห้อ/รุ่น Intel NUC Gen 11 40
3.2	คุณสมบัติของเซนเซอร์วัดระยะด้วยแสง Livox Avia 41
3.3	คุณสมบัติของแบตเตอรี่ ยี่ห้อ/รุ่น Makita BL1850B 43
3.4	คุณสมบัติของบอร์ดควบคุม Relay ยี่ห้อ/รุ่น DIYMore ESP-12F 44
3.5	คุณสมบัติของมอเตอร์แรงบิดสูง 2 เฟลา 45
3.6	ค่าปริมาตรกล่องสอบเทียบที่ประเมินได้จากระบบ 48
3.7	การกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ค่าความแม่นยำในการประเมิน ปริมาตรวัสดุของระบบ 9
3.8	ผลการทดสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรของระบบที่พัฒนา 59
4.1	ผลการทดสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุ 1 ลูกบาศก์เมตร 63
4.2	ผลการทดสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุ 5 ลูกบาศก์เมตร 65
4.3	ผลลัพธ์การทดสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุ 10 ลูกบาศก์เมตร 67

สารบัญญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	พื้นที่เก็บสินค้ากลางแจ้ง	8
2.2	พื้นที่เก็บสินค้าในคลังเก็บสินค้าที่มีการกองวัสดุชนิดผนัง	9
2.3	เครื่องรับสัญญาณ GNSS	9
2.4	ลานเก็บสินค้ากลางแจ้ง ในวันที่ท้องฟ้ามีดครึ้ม	10
2.5	คลังเก็บสินค้า ในสภาพแสงสว่างน้อย	11
2.6	การทำหมุดอ้างอิงตำแหน่ง (GCP)	11
2.7	การจัดเก็บน้ำตาตลับในคลังเก็บสินค้า	12
2.8	อากาศยานไร้คนบิน DJI Spreading Wings S1000	13
2.9	เครื่องสแกนเรเซอร์แบบภาคพื้น FARO Focus	13
2.10	ลักษณะของวัสดุเทกองที่ผ่านการกดอัดด้วยเครื่องจักร	14
2.11	ลักษณะกองแม่ปุ๋ยที่มีการจัดเก็บซ้อนทับกันสูง	15
2.12	การนับรถบรรทุกขณะขนถ่ายสินค้า	16
2.13	การทำงานของเครื่องรับสัญญาณ GNSS	17
2.14	เป้าปริซึมสำหรับใช้งานร่วมกับ Total station	18
2.15	การทำงานของเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น	19
2.16	การทำงานของอากาศยานไร้คนบิน	20
2.17	การประมาณค่าตำแหน่งต่าง ๆ ของ SLAM	21
2.18	Visual SLAM system framework	22
2.19	2D LiDAR ยี่ห้อ/รุ่น Hokuyo URG-04LX และ RPLidar-A1	23
2.20	การทำงานของ 3D Mechanical LiDAR	24
2.21	Solid-state LiDAR ยี่ห้อ/รุ่น Livox Mid-40	24
2.22	LiDAR Handheld ยี่ห้อ/รุ่น GeoSLAM ZEB Horizon	25
2.23	PLUG-AND-PLAY LiDAR ยี่ห้อ/รุ่น Hovermap ST	25
2.24	อากาศยานไร้คนบินที่ใช้เทคนิค SLAM ยี่ห้อ/รุ่น FLYABILITY Elios 3	26
2.25	1D Laser Scanner System ยี่ห้อ/รุ่น ABB VM3D	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26	Acoustics-based Level Sensor ยี่ห้อ/รุ่น BinMaster 3D Level Scanner 27
2.27	Triangulated Irregular Network..... 28
2.28	การคำนวณปริมาตรของปริซึมสามเหลี่ยมแต่ละอัน 29
2.29	กระบวนการสร้าง Grid จากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ 29
2.30	การคำนวณปริมาตรของปริซึมสี่เหลี่ยมแต่ละอัน..... 30
2.31	การประเมินปริมาตร โดยการสร้างลูกบาศก์ตามขนาดกริดที่ตั้งค่าไว้ 32
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 37
3.2	แนวคิดการออกแบบระบบ 39
3.3	Mini PC ยี่ห้อ/รุ่น Intel NUC Gen 11..... 39
3.4	Solid-state LiDAR ยี่ห้อ/รุ่น Livox Avia..... 41
3.5	แบตเตอรี่ ยี่ห้อ/รุ่น Makita BL1850B 43
3.6	บอร์ดควบคุม Relay ยี่ห้อ/รุ่น DIYMore ESP-12F 44
3.7	มอเตอร์แรงบิดสูง 2 เฟลา 44
3.8	ชุดกล่องระบบเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติด้วย Solid-state Lidar 45
3.9	การปรับแก้ค่าพื้นฐานของเซนเซอร์ Solid-state Lidar..... 46
3.10	การแสดงผลข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติในโปรแกรม RVIZ..... 47
3.11	จุดควบคุมภาคพื้น (Ground control point) รูปทรงสี่เหลี่ยม..... 47
3.12	ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติโครงสร้างรางแขวนที่มีการอ้างอิงตำแหน่ง 48
3.13	กล่องสอบเทียบปริมาตรขนาด 0.101 ลูกบาศก์เมตร..... 48
3.14	กองแก้วแห้ง รูปทรงกรวยความชันเดียว 50
3.15	มุมสแกนเก็บข้อมูลที่ 0 องศา 51
3.16	มุมสแกนเก็บข้อมูลที่ 45 องศา..... 52
3.17	มุมสแกนเก็บข้อมูลที่ 90 องศา..... 52
3.18	การนำเข้าไฟล์ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติในโปรแกรม CloudCompare 53
3.19	ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ยังไม่จัดระนาบ 54
3.20	ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่จัดระนาบตามแนวแกนแล้ว..... 54
3.21	ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ตัดเอาเฉพาะส่วนกวงวัสดุ 55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22	ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ขาดหายจากการจำกัด Noise มากเกินไป.....56
3.23	การสร้างแบบจำลองสามมิติจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ57
3.24	การแปลงแบบจำลองสามมิติเป็นข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ58
3.25	การประเมินปริมาตรจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ58
3.26	การสแกนเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติด้วย FARO FOCUS..... 60
4.1	เกลบแห่งปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร62
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตรกับความเร็วในการเคลื่อนที่.....64
4.3	เกลบแห่งปริมาตร 5 ลูกบาศก์เมตร65
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง ปริมาตร 5 ลูกบาศก์เมตรกับความเร็วในการเคลื่อนที่.....66
4.5	เกลบแห่งปริมาตร 10 ลูกบาศก์เมตร66
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง ปริมาตร 10 ลูกบาศก์เมตรกับความเร็วในการเคลื่อนที่68
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสแกนเก็บข้อมูลที่ 0 องศา กับค่าความแม่นยำ ในการประเมินปริมาตรกองวัสดุขนาดต่าง ๆ.....69
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสแกนเก็บข้อมูลที่ 45 องศา กับค่าความแม่นยำใน การประเมินปริมาตรกองวัสดุขนาดต่าง ๆ.....69
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสแกนเก็บข้อมูลที่ 90 องศา กับค่าความแม่นยำใน การประเมินปริมาตรกองวัสดุขนาดต่าง ๆ..... 70
4.10	กราฟค่าส่วนตักค้างของผลตอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร จากการทดลอง..... 71
4.11	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบสนองค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร..... 72
4.12	ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมของค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร 72
4.13	ความหนาของข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติของกองวัสดุปริมาตร 5 ลูกบาศก์เมตร ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 5 เซนติเมตรต่อวินาที ณ มุมที่แตกต่างกัน 73
4.14	กองวัสดุปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร มีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก..... 74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากข้อมูลกรมการข้าว สถานการณ์การผลิตข้าวทั่วโลก ในปี 2565-2566 คาดว่าผลผลิตข้าวโลกจะมีประมาณ 515.35 ล้านตันข้าวสาร เพิ่มขึ้น 1.68 ล้านตันข้าวสาร เนื่องจากผลผลิตข้าวในประเทศของผู้ผลิตสำคัญ ได้แก่ จีน อินเดีย บังกลาเทศ อินโดนีเซีย เวียดนาม ไทย เมียนมา ปากีสถาน กัมพูชา ไนจีเรีย และเนปาล มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยจีนมีปริมาณข้าวคงเหลือมากที่สุด ปริมาณ 109.00 ล้านตันข้าวสาร รองลงมา คือ อินเดีย 39.70 ล้านตันข้าวสาร และฟิลิปปินส์ 4.30 ล้านตัน ในประเทศไทย กรมการข้าววางแผนการผลิตข้าวที่ปริมาณ 19.52 ล้านตันข้าวสาร ลดลง 2.31 ล้านตันข้าวสารจากปีก่อนหน้า ส่วนการบริโภคข้าวไทยในประเทศ คาดว่าจะมีประมาณ 10.97 ล้านตันข้าวสาร ลดลง 0.53 ล้านตันข้าวสาร เนื่องจากอัตราการบริโภคข้าวของประชากรไทยมีแนวโน้มลดลง

สำหรับการส่งออกข้าวไทย คาดว่าจะมีปริมาณ 7.00 ล้านตันข้าวสาร เพิ่มขึ้น 0.88 ล้านตัน หรือร้อยละ 14.38 จากปีการผลิต 2564/65 เนื่องจากค่าเงินบาทอ่อนค่า ส่งผลให้ราคาส่งออกข้าวไทยปรับตัวลดลงมาอยู่ในระดับที่สามารถแข่งขันได้ ประกอบกับมีความต้องการใช้ข้าวเพื่อนำไปทดแทนวัตถุดิบอาหารสัตว์เพิ่มขึ้น ข้าวไทยจึงเป็นที่ต้องการในตลาดโลกอย่างต่อเนื่อง ทำให้ธุรกิจโรงสีข้าวมีโอกาสขยายตัวจากปริมาณผลผลิตที่เพิ่มขึ้น แต่การทำกำไรยังมีข้อจำกัดจากปัญหาค่าล้งสีข้าวส่วนเกินในระบบอยู่ในระดับสูง โดยเฉพาะกลุ่มผู้ประกอบการขนาดเล็กมักเสียเปรียบรายกลางและรายใหญ่ด้านอำนาจต่อรองในการซื้อวัตถุดิบ ทำให้มีต้นทุนรับซื้อข้าวสูงกว่า กลุ่มที่แข่งขันได้จึงเป็นโรงสีข้าวขนาดใหญ่ครบวงจร (Sowcharoensuk, 2566) ถึงกระนั้นโรงสีข้าวยังประสบกับปัญหาอย่างอื่นอยู่ เช่น การขาดแคลนเงินทุน การขาดแคลนแรงงาน ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงนโยบายรัฐบาล และการบริหารจัดการคลังเก็บสินค้ายังไม่มีประสิทธิภาพ ท่ามกลางปัญหาเหล่านี้ทำให้บรรดาธุรกิจโรงสีข้าวต้องเร่งปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ เพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการและลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องพัฒนากระบวนการผลิตด้วยเทคโนโลยีใหม่ ๆ ให้สอดคล้องกับแนวโน้มการผลิตของอุตสาหกรรมโลก เช่น การพัฒนาเครื่องลดความชื้นในข้าวเปลือก อุปกรณ์จำกัดมอด หรือระบบจัดการคลังเก็บสินค้าอัตโนมัติ เป็นต้น

สำหรับโรงสีข้าวขนาดใหญ่จะมีการเก็บข้าวเปลือกไว้ในโกดังแบบเทกอง เพื่อเพิ่มปริมาณการใช้พื้นที่โกดังได้ดีกว่าการบรรจุถุง เพราะการบรรจุถุงอาจมีความเสี่ยงสูงแตกหักซ้อนทับกันมาก

เกินไป และในส่วนของตรวจสอบสต็อกสินค้าในคลัง วิธีพื้นฐานที่สุดในการประเมินสินค้าคงคลัง คือ การติดตามน้ำหนักหรือปริมาตรที่บรรทุก (Hugenholtz et al., 2015) เช่น การคำนวณจากหน้าตา ซึ่ง คือ นำเข้าลบส่งออก ก็จะได้ค่าจำนวนวัสดุของคงเหลือ แต่วิธีนี้อาจคลาดเคลื่อน เพราะปัจจัยภายในที่เกิดขึ้น เช่น การเกิดความชื้นข้าวเน่าเสีย การเข้ามากินของนกพิราบ และการทุจริต เป็นต้น โดยปัจจุบันเทคโนโลยีสมัยใหม่เริ่มเข้ามามากขึ้น เช่น การประมาณปริมาณวัสดุของโดยใช้กล้องประมวลผลรวม (Total Station) และการสำรวจด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS แบบเรียลไทม์ (RTK-GNSS) ได้รับความสนใจมากขึ้น (Arango and Morales, 2015) (Raeva et al, 2016) (Pratomo et al., 2019) (Ajayi and Ajulo, 2021) ซึ่งเครื่องมือที่เห็นส่วนใหญ่ในการตรวจสอบวัสดุของในคลังสินค้าของประเทศไทย มักจะใช้ Total Station เพราะสามารถวัดได้แม่นยำถึงระดับมิลลิเมตร (Luo et al., 2016) แต่การสำรวจด้วย Total Station จะใช้เวลานานและไม่สามารถนำไปใช้กับสินค้าของที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ คล้ายกับการสำรวจด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS และการใช้อากาศยานไร้คนบินที่เหมาะสมกับกองวัสดุที่กองไว้กลางแจ้ง เพราะต้องใช้ GNSS ซึ่งเกี่ยวข้องกับการรับสัญญาณจากดาวเทียม เพื่อใช้ในการบินเก็บข้อมูล หรือจะเป็นเครื่องสแกนเรเซอร์แบบภาคพื้น ที่จะเหมาะสมกับทั้งการประเมินปริมาตรวัสดุกลางแจ้งและในร่ม ข้อมูลที่ได้มีคุณภาพสูงกว่าวิธีการเก็บข้อมูลด้วย Total Station อากาศยานไร้คนบิน และเครื่องรับสัญญาณ GNSS แม้จะได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการอื่น แต่การศึกษาส่วนใหญ่บอกว่าเครื่องสแกนเรเซอร์แบบภาคพื้น นั้นใช้เวลานานและไม่ปลอดภัย คล้ายกับการสำรวจด้วย Total Station และเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่เจ้าหน้าที่จำเป็นต้องปีนขึ้นไปบนกองสินค้า (Zhu et al., 2018)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการประเมินปริมาตรวัสดุของในคลังเก็บสินค้า โดยการใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์วัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ เพื่อลดข้อจำกัดด้านการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเรเซอร์แบบภาคพื้นที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลวัสดุของได้อย่างรวดเร็ว และข้อมูลที่ได้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการประเมินปริมาตรมากขึ้น งานวิจัยเริ่มตั้งแต่การทบทวนวรรณกรรม การออกแบบระบบ ไปจนถึงการทดสอบค่าความแม่นยำของระบบในการประเมินปริมาตรวัสดุของเพื่อศึกษาประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของระบบที่พัฒนาขึ้น จะทำให้ผู้ประกอบการโรงสีข้าวสามารถเพิ่มศักยภาพในการบริหารจัดการคลังเก็บสินค้าแบบกองได้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุของในคลังเก็บสินค้า โดยใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์วัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุของในคลังเก็บสินค้า ที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยการใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์วัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ โดยมีขอบเขตการศึกษา ดังนี้

1.3.1 ขอบเขตด้านพื้นที่การศึกษา

ทำการวิจัยในพื้นที่ปฏิบัติการขนาดเท่ากับ 108 ลูกบาศก์เมตร โดยจำลองสถานการณ์ภายในคลังเก็บวัสดุเทกองแบบเสมือนจริง

1.3.2 ขอบเขตด้านข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลได้จากการวิจัย โดยจะทำการเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ (Pointclouds) จากกระบวนการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยการใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์วัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น โดยมีการสอบเทียบค่าความแม่นยำของระบบก่อนทำการเก็บข้อมูลจริง เพื่อให้ได้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรมากกว่า 95% โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ดังนี้

ตัวแปรอิสระ

การพัฒนากระบวนการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยการใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์วัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ แบ่งตัวแปรอิสระเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- 1) ปริมาตรวัสดุเทกอง โดยกำหนดค่าปริมาตรวัสดุเทกอง เท่ากับ 1, 5 และ 10 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ
- 2) ความเร็วในการเคลื่อนที่เก็บข้อมูล โดยกำหนดค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ เท่ากับ 2, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ
- 3) มุมสแกนเก็บข้อมูล โดยกำหนดค่ามุมสแกน เท่ากับ 0, 45 และ 90 องศา ตามลำดับ

ตัวแปรตาม

การพัฒนากระบวนการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยการใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์วัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ มีตัวแปรตามเป็นค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า ที่ปริมาตรวัสดุเทกอง มุมสแกน และความเร็วในการเคลื่อนที่เก็บข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยมีการเก็บข้อมูลซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร

ตัวแปรควบคุม

การพัฒนากระบวนการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยการใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์วัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ แบ่งตัวแปรควบคุมเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) สภาพแวดล้อมของห้องปฏิบัติการ มีผนังกันปิดมิดชิดทุกด้าน สภาพอากาศปกติ อุณหภูมิและความชื้นอยู่ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2567 ซึ่งมีค่าอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการเฉลี่ยประมาณ 35 ถึง 40 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองในช่วงเวลา 13.00 ถึง 16.00 น.

2) ขนาดโครงสร้างราง มีขนาด 36 ตารางเมตร โดยจะติดตั้งระบบไว้ที่ความสูง 3 เมตร จากพื้นห้องปฏิบัติการ

3) ลักษณะการเทกองวัสดุทดสอบจะอยู่ในรูปแบบทรงกรวยความชันเดียว ไม่มีการกดอัดให้แน่น

1.3.3 ขอบเขตด้านวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

1) เก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติด้วยเซนเซอร์วัดระยะด้วยแสงแบบSolid-State ยี่ห้อ/รุ่น Livox Avia

2) จัดการข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติและประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง โดยใช้โปรแกรม CloudCompare

3) วัสดุเทกองตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ แกลบแห้ง ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความแม่นยำของระบบที่พัฒนาขึ้น โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่	ปริมาตรที่ทราบค่า (ลบ.ม.)
1	1
2	5
3	10

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยใช้เทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ

1.4.2 สามารถกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับค่าความแม่นยำของการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยใช้เทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้น

1.5 นิยามคำศัพท์

1.5.1 วัสดุเทกอง (Bulk materials) หมายถึง สินค้าที่มีการจัดเก็บในคลังเก็บสินค้าด้วยวิธีการเทกอง โดยจะเก็บรวบรวมสินค้าจำนวนหนึ่ง เพื่อรอการจัดส่งให้ลูกค้าในจำนวนที่ต้องการ เป็น

วิธีการในการลดพื้นที่ในการจัดเก็บ เพราะสามารถซ้อนทับกันได้ดีกว่าวิธีการบรรจุลงถุงกระสอบ โดยสินค้าส่วนใหญ่จะเป็นพวกผลผลิตทางการเกษตร แร่ ปุ๋ย เป็นต้น (อารยา สยามรัตน์กิจ และคณะ, 2021) ซึ่งมักจะมีการขนส่งมาทางเรือลากจูง เมื่อเทียบท่าจะมีการขนถ่ายขึ้นรถบรรทุกหรือสายพานลำเลียง เพื่อนำเข้าไปเก็บในคลังเก็บสินค้า

1.5.2 ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ (Pointclouds data) หมายถึง การรวบรวมจุดข้อมูลในระบบพิกัดสามมิติ จุดเหล่านี้แสดงถึงพื้นผิวภายนอกของวัตถุ ซึ่งบันทึกผ่านเทคโนโลยีการสแกนต่าง ๆ เช่น LiDAR, โฟโตแกรมเมตรี หรือเครื่องสแกนเรเซอร์แบบภาคพื้น โดยแต่ละจุดในกลุ่มจุดข้อมูลมีตำแหน่งที่กำหนดไว้ในปริภูมิ (พิกัด x, y, z) และบางครั้งก็มีคุณลักษณะเพิ่มเติม เช่น สีหรือความเข้ม เป็นต้น ซึ่งข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ การสร้างแบบจำลองสามมิติ และการมองเห็นด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างการนำเสนอสภาพแวดล้อมทางกายภาพที่มีรายละเอียดและแม่นยำสูง (Rusu and Cousins, 2011)

1.5.3 เทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสง (LiDAR technology) หมายถึง วิธีการตรวจจับระยะไกลที่ใช้แสงเลเซอร์ในการวัดระยะทางไปยังเป้าหมาย เทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงหรือ LiDAR ทำงานโดยการปล่อยพัลส์เลเซอร์ไปยังพื้นผิวของวัตถุและวัดเวลาที่แสงสะท้อนกลับคืนสู่เซ็นเซอร์ การวัดเวลาการเดินทางของแสงนี้ จะใช้ในการคำนวณระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์และเป้าหมาย ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองสามมิติจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่แม่นยำของพื้นที่ที่ทำการสแกนเก็บข้อมูลได้ (Wehr and Lohr, 1999) โดยสูตรที่ใช้ในการคำนวณระยะทาง (Mehendale and Neoge, 2020) คือ

$$D = c \left(\frac{\Delta T}{2} \right) \quad (1.1)$$

โดย D คือ ระยะห่างของวัตถุ
 c คือ ความเร็วของแสง
 ΔT คือ เวลาที่แสงใช้ในการเดินทาง

1.5.4 การประเมินปริมาตร (Volume estimation) หมายถึง การประมาณค่าปริมาตรของวัสดุ โดยจะทำการประเมินในกรณีที่มีการวัดแบบปกติไม่สามารถทำได้ หรือหากทำได้ก็ต้องใช้วิธีการที่มีความซับซ้อน และต้องใช้ระยะเวลานาน ซึ่งวิธีการประเมินปริมาตรแบบดั้งเดิม มักอาศัยการคำนวณทางเรขาคณิต ตัวอย่างเช่น ลูกบาศก์ ทรงกลม หรือทรงกระบอก เป็นต้น โดยสามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรทางคณิตศาสตร์ อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้จะแม่นยำน้อยลงเมื่อประเมินปริมาตรกับวัสดุที่มีรูปร่างไม่ปกติหรือวัสดุเทกองจำนวนมาก (Tarsha-Kurdi et al., 2007) ส่วนใหญ่

มักนิยมใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เพื่อติดตามความคืบหน้าและความเปลี่ยนแปลงในคลังเก็บสินค้า ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ได้จากเครื่องมือสำรวจแบบต่าง ๆ มาใช้ในการประเมิน ปริมาตร เช่น LiDAR โฟโตแกรมเมตรี และเครื่องสแกนเรเซอร์แบบภาคพื้น เป็นต้น



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า ด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ ทำการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในปัจจุบัน เพื่อนำมาพัฒนาต้นแบบระบบการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยใช้ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติครอบคลุมหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

- 2.1 ความแตกต่างและข้อจำกัดของการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองกลางแจ้งและในอาคาร
- 2.2 เครื่องมือในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง
- 2.3 วิธีการประเมินปริมาตรด้วยเทคนิค 2.5D จากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ
- 2.4 ซอฟต์แวร์ในการประเมินปริมาตรจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความแตกต่างและข้อจำกัดของการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองกลางแจ้งและในอาคาร

การประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง ถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การทำเหมืองแร่ การติดตามงานก่อสร้าง และการขนส่ง เป็นต้น ซึ่งการเข้าใจเกี่ยวกับความแตกต่างและข้อจำกัดของการประเมินปริมาตรกลางแจ้งและภายในคลังเก็บสินค้าจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งจะทำให้หน่วยงานที่นำเครื่องมือประเมินปริมาตรประเภทต่าง ๆ ไปใช้ สามารถเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยได้แบ่งแยกความแตกต่างระหว่างการประเมินปริมาตรกลางแจ้งและภายในอาคารไว้ดังนี้

2.1.1 พื้นที่เก็บสินค้า

1) พื้นที่เก็บสินค้ากลางแจ้ง

พื้นที่จัดเก็บกลางแจ้ง มักเป็นพื้นที่เปิดโล่งขนาดใหญ่ ไม่มีโครงสร้างของอาคารมาปกคลุม วัสดุเทกองส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่สามารถกระทบความชื้น แสงแดดได้ เช่น แร่ ถ่านหินทราย เป็นต้น ดังแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งการประเมินปริมาตรของวัสดุเหล่านี้ สามารถใช้เครื่องมือได้หลากหลายตั้งแต่ Total Station ไปจนถึงอากาศยานไร้คนบิน แต่ในปัจจุบันนิยมใช้อากาศยานไร้

นักบินเพราะสามารถเก็บข้อมูลได้ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ดีกว่าวิธีการอื่น ๆ และยังให้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรและความรวดเร็วในการเก็บข้อมูลอีกด้วย (Arango and Morales, 2015)



รูปที่ 2.1 พื้นที่เก็บสินค้ากลางแจ้ง (de Lima, 2021)

2) พื้นที่เก็บสินค้าในอาคาร

การจัดเก็บวัสดุเทกองในคลัง ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมได้ง่าย เช่น ปุ๋ย ผลผลิตภาคการเกษตร เป็นต้น ซึ่งการจัดเก็บอาจจะยาวนานตั้งแต่ 1 เดือนไปจนถึง 6 เดือน เพื่อรอจัดส่งไปยังกระบวนการต่อไป หากไม่มีการประเมินปริมาตรเป็นระยะ จะทำให้ไม่สามารถตรวจสอบปริมาณวัสดุที่คงเหลืออยู่ในคลังได้ โดยวิธีการพื้นฐานที่สุดในการตรวจสอบ คือ การตรวจสอบตามเอกสาร ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูง เพราะวัสดุบางชนิดสามารถเกิดการสลายตัวจากการจัดเก็บได้ง่าย เครื่องมือประเมินปริมาตรที่เห็นนำมาใช้ในการตรวจสอบวัสดุเทกองในคลัง ส่วนใหญ่จะเป็น Total station และเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น (TLS) เพราะพื้นที่ภายในอาคารมีจำกัด จึงไม่เหมาะกับการใช้อากาศยานไร้คนบิน แต่การใช้ Total station และเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้นก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ หากลักษณะการเก็บสินค้าเต็มคลังจนเจ้าหน้าที่ไม่สามารถเดินเก็บข้อมูลได้อย่างครอบคลุม ก็อาจทำให้การประเมินปริมาตรคลาดเคลื่อนได้ง่าย ดังแสดงดังรูปที่ 2.2 รวมไปถึงอันตรายจากวัสดุที่เป็นพิษ เช่น การสลายตัวของแม่ปุ๋ย หรือแร่บางประเภท จะส่งผลเสียต่อสุขภาพของเจ้าหน้าที่ได้



รูปที่ 2.2 พื้นที่เก็บสินค้าในคลังเก็บสินค้าที่มีการกองวัสดุชนิดผง

2.1.2 สัญญาณ GNSS

1) สัญญาณ GNSS กลางแจ้ง

สัญญาณของระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก (GNSS) มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นเมื่ออยู่กลางแจ้งเนื่องจากท้องฟ้าเปิด ซึ่งช่วยให้ระบุตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง อย่างไรก็ตาม บางครั้งสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง อาจมีสิ่งกีดขวางในการเก็บข้อมูล เช่น ต้นไม้ อาคาร หรือภูมิประเทศ อาจรบกวนสัญญาณ GNSS ได้ โดยเครื่องมือประเมินปริมาตรส่วนใหญ่ที่ใช้ระบบ GNSS คือ เครื่องรับสัญญาณ GNSS ดังแสดงดังรูปที่ 2.3 และอากาศยานไร้คนบังคับ ซึ่งยังสามารถจับสัญญาณดาวเทียมได้มากเท่าไร ยิ่งทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.3 เครื่องรับสัญญาณ GNSS (Chekole, 2014)

2) สัญญาณ GNSS ในอาคาร

เนื่องจากโครงสร้างหลังคาและผนังที่หนาแน่น มักทำให้สัญญาณ GNSS ถูกลดทอนลงอย่างมาก ซึ่งจะจำกัดการใช้งานสัญญาณ GNSS สำหรับการประเมินปริมาณภายในอาคารได้ ดังนั้น จึงไม่นิยมใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่มีการรับสัญญาณ GNSS เพราะอาจจะทำให้การเก็บข้อมูลคลาดเคลื่อนได้มากขึ้น เครื่องมือที่สามารถใช้ได้ดีในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสัญญาณ GNSS คือ กล้องถ่ายภาพร่วมกับเทคนิคการทำ Photogrammetry, Total station และเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น ซึ่งเครื่องมือแต่ละประเภทให้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรและต้นทุนค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกัน

2.1.3 แสงสว่าง

1) แสงสว่างกลางแจ้ง

คลังเก็บสินค้ากลางแจ้งได้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ ซึ่งช่วยให้สามารถเก็บข้อมูล เพื่อนำไปประเมินปริมาตรได้ อย่างไรก็ตามการประเมินปริมาตรสินค้ากลางแจ้ง อาจขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในแต่ละวัน ซึ่งยากต่อการวางแผนตรวจสอบแบบรอบระยะเวลา หากท้องฟ้ามีดครึ้มหรือหมอกหนา อาจลดการมองเห็นและส่งผลกระทบต่อกรรวบรวมข้อมูลได้ง่าย ดังแสดงดังรูปที่ 2.4 ที่ลานเก็บสินค้ากลางแจ้งในวันที่ท้องฟ้ามีดครึ้ม

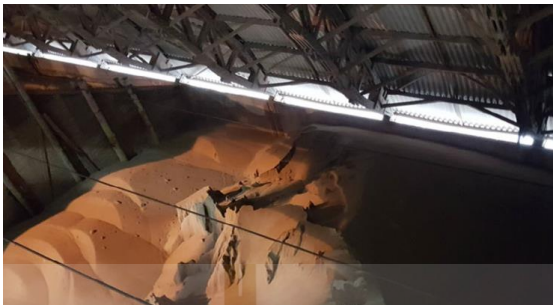


รูปที่ 2.4 ลานเก็บสินค้ากลางแจ้ง ในวันที่ท้องฟ้ามีดครึ้ม (Chulapong, 2018)

2) แสงสว่างในอาคาร

สภาพแวดล้อมภายในคลังเก็บสินค้า มักมีสภาพแสงสว่างน้อย ดังแสดงดังรูปที่ 2.5 แต่หากบางหน่วยงานมีงบประมาณเพียงพอ อาจมีการติดตั้งหลอดไฟส่องสว่างเพิ่มเติม ทำให้มีแสงสว่างสม่ำเสมอครอบคลุมพื้นที่คลังทั้งหมด ซึ่งช่วยในการประเมินปริมาตรได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตามควรคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่มีการสะท้อนแสงสูง บางครั้งอาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบที่ใช้การสแกนเรเซอร์ ซึ่งนำไปสู่การเก็บข้อมูลที่คลาดเคลื่อนไป ในกรณีที่มีแสงสว่างเพียงพอ เครื่องมือในการ

ประเมินปริมาตรในคลังจะใช้ Total station และเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น และกรณีที่มีแสงสว่างน้อย มักจะใช้เครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้นเป็นหลัก



รูปที่ 2.5 คลังเก็บสินค้า ในสภาพแสงสว่างน้อย (Gago et al., 2021)

2.1.4 ลักษณะของกองวัสดุ

1) ลักษณะของกองวัสดุกลางแจ้ง

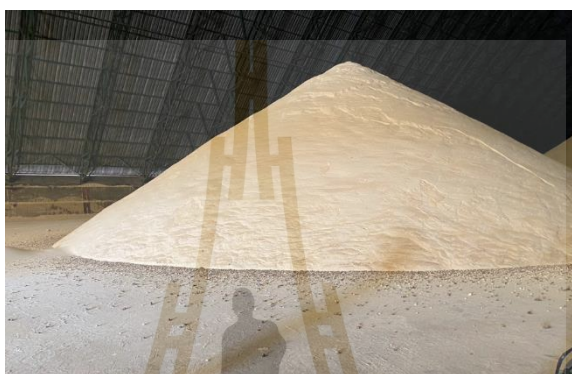
การจัดเก็บวัสดุเทกองกลางแจ้ง มักจะเทกองลงบนพื้นผิวที่มีฐานกองที่ไม่เรียบ เช่น แร่ หิน ทราย เป็นต้น ซึ่งการประเมินปริมาตรวัสดุกลางแจ้ง จำเป็นต้องเก็บข้อมูลพื้นที่รอบกองวัสดุ เพื่อใช้ในการอ้างอิงพื้นผิวที่มีระดับไม่เท่ากัน หากไม่มีการเก็บข้อมูลหรือการทำหมุดอ้างอิงตำแหน่ง (GCP) อาจจะทำให้ข้อมูลที่ได้ มีความคลาดเคลื่อนจากการประเมินปริมาตรส่วนฐานกอง ผิดเพี้ยนได้ โดยเครื่องมือที่นิยมใช้ในคลังสินค้ากลางแจ้ง ที่มีระดับความสูงพื้นที่แตกต่างกัน คือ อากาศยานไร้คนบิน เพราะจะมีการเก็บข้อมูลจุดควบคุมภาคพื้นร่วมด้วย ดังแสดงดังรูปที่ 2.6 เพื่อใช้ในการประมวลผล ปรับค่าความถูกต้องข้อมูลที่ได้กับสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความแม่นยำของการประเมินปริมาตรโดยตรง



รูปที่ 2.6 การทำหมุดอ้างอิงตำแหน่ง (GCP)

2) ลักษณะของกองวัสดุในอาคาร

การจัดเก็บวัสดุเทกองในคลัง ส่วนใหญ่จะไหลมาตามสายผ่านลำเลียง ซึ่งการเทกองจะมีลักษณะรูปทรงกรวยความชันเดียว ซึ่งง่ายต่อการประเมินปริมาตร เช่น น้ำตาลดิบ ข้าวเปลือก มันสำบ เป็นต้น และพื้นคลังมีความราบเรียบเท่ากันอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงดังรูปที่ 2.7 เครื่องมือที่ใช้ประเมินปริมาตรจึงมีความหลากหลาย ตั้งแต่ลูกดิ่ง เทปไม้เมตร ไปจนถึงเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น (TLS)



รูปที่ 2.7 การจัดเก็บน้ำตาลดิบในคลังเก็บสินค้า

2.1.5 น้ำหนักของเครื่องมือ

1) น้ำหนักของเครื่องมือเก็บข้อมูลกลางแจ้ง

ในสภาพแวดล้อมของคลังเก็บสินค้ากลางแจ้ง น้ำหนักของเครื่องมือในการใช้ประเมินปริมาตร เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากพื้นที่คลังที่มีขนาดใหญ่ เจ้าหน้าที่จำเป็นต้องมีการเดินเก็บข้อมูลรอบกองวัสดุ การแบกอุปกรณ์เครื่องมือที่มีน้ำหนักมาก อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของเจ้าหน้าที่ในระยะยาว ดังนั้น ควรเลือกเครื่องมือที่มีความคล่องตัวและน้ำหนักเบา เช่น เครื่องรับสัญญาณ GNSS หรืออากาศยานไร้คนบังคับ ดังแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 อากาศยานไร้คนขับ DJI Spreading Wings S1000 (Kwoczynska, 2021)

2) น้ำหนักของเครื่องมือเก็บข้อมูลในอาคาร

คลังเก็บสินค้าภายในอาคาร มีพื้นที่เก็บสินค้าขนาดใหญ่เหมือนคลังสินค้ากลางแจ้ง น้ำหนักของเครื่องมือในการประเมินปริมาตร อาจจะไม่ใช่ว่าปัจจัยหลักในการเลือกใช้ ซึ่งควรจะมุ่งเน้นไปมีความแม่นยำในการประเมินปริมาตรและความคุ้มค่าของเครื่องมือ ตัวอย่างเครื่องมือ เช่น เครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น ที่มีความแม่นยำในการเก็บข้อมูลสูง เพราะใช้การส่องกวาดของแสงเลเซอร์ในการเก็บข้อมูล ดังแสดงดังรูปที่ 2.9



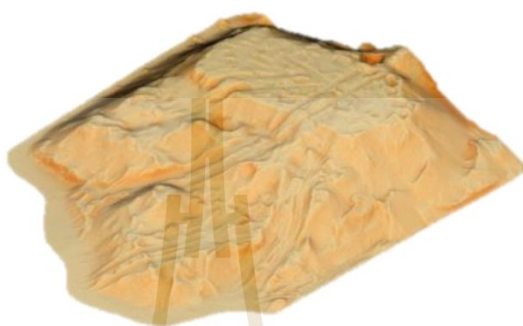
รูปที่ 2.9 เครื่องสแกนเรเซอร์แบบภาคพื้น FARO FOCUS (Manish et al., 2022)

2.1.6 ความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงาน

1) ความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานกลางแจ้ง

การประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้ากลางแจ้ง สินค้าส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีความแน่นตัวสูง ผ่านการกดอัดด้วยเครื่องจักรมาแล้ว ซึ่งทำให้สามารถเดินเหยียบหรือขึ้นไปเก็บข้อมูลได้ โดยเครื่องมือประเมินปริมาตรที่จำเป็นต้องขึ้นไปเก็บข้อมูลบนกองวัสดุ เช่น เครื่องรับ

สัญญาณ GNSS, Total station หรือ เครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น เหตุผลที่ต้องขึ้นบนกองวัสดุ เพราะว่าเจ้าหน้าที่จำเป็นต้องตรวจสอบกองวัสดุ ลักษณะการจัดวางกอง เช่น กองวัสดุที่มีหลุมยุบตรงกลาง กองวัสดุที่มีรูปร่างซับซ้อน ดังแสดงดังรูปที่ 2.10 หากมีจุดที่เครื่องมือเก็บข้อมูลได้ไม่ครอบคลุม และตรวจสอบไม่ดีพอ อาจจะทำให้การประเมินปริมาตรคลาดเคลื่อนได้โดยง่าย แต่อย่างไรก็ได้หากเจ้าหน้าที่เลือกใช้เครื่องมือประเภทอากาศยานไร้คนบิน ปัญหาเหล่านี้ก็จะหมดไป



รูปที่ 2.10 ลักษณะของวัสดุเทกองที่ผ่านการกดอัดด้วยเครื่องจักร

2) ความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานในอาคาร

สภาพแวดล้อมของการจัดเก็บวัสดุเทกองในอาคาร ส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่ปิดมิดชิด เพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดจากสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้สภาพอากาศภายในคลังไม่ถ่ายเท หากเป็นวัสดุที่มีการสลายตัวได้ง่าย เช่น แม่ปุ๋ย หรือแร่ธาตุต่าง ๆ ดังแสดงดังรูปที่ 2.11 ยิ่งจะทำให้การทำงานของเจ้าหน้าที่เสี่ยงอันตรายต่อสุขภาพมากขึ้น รวมไปถึงลักษณะการวางกองวัสดุภายในคลัง จะมีการซ้อนทับกันจนสูงชิดผนังอาคาร ซึ่งยากต่อการปีนขึ้นไปเก็บข้อมูล อย่างไรก็ตามบางครั้งเก็บสินค้าจะมีการออกแบบโครงสร้างคลังเก็บให้มีทางเดินเชื่อมต่อกันเหนือกองวัสดุ ซึ่งจะทำให้สามารถเดินเก็บข้อมูล เพื่อใช้ในการประเมินปริมาตรได้ โดยเครื่องมือที่เหมาะสมในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บลักษณะนี้ จะเป็นการใช้กล้องถ่ายภาพร่วมกับเทคนิคการทำ Photogrammetry ที่ถูกติดตั้งไว้ตามจุดต่าง ๆ ของอาคาร เช่น เสาคาน เป็นต้น ซึ่งจะช่วยลดอันตรายจากการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่เข้าไปตรวจประเมินในคลังได้



รูปที่ 2.11 ลักษณะกองแม่ปุ๋ยที่มีการจัดเก็บซ้อนทับกันสูง

ความแตกต่างและข้อจำกัดในการประเมินปริมาณวัสดุเทกองกลางแจ้งและในอาคาร มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อทางเลือกวิธีการและเทคโนโลยีที่ใช้ การประเมินปริมาณในคลังกลางแจ้ง ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลากหลาย เช่น ลักษณะภูมิประเทศ สภาพอากาศ ลักษณะการวางกอง ในทางกลับกัน การประเมินปริมาณวัสดุเทกองภายในอาคาร จะได้รับประโยชน์จากสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม แสงสว่างที่สม่ำเสมอ และการวางกองวัสดุในที่ที่มีโครงสร้างอาคารปกคลุม แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ยังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ตรวจประเมิน การทำความเข้าใจความแตกต่างเหล่านี้ ถือเป็นสิ่งสำคัญในการเลือกเครื่องมือที่เหมาะสม สำหรับการประเมินปริมาณในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 เครื่องมือในการประเมินปริมาณวัสดุเทกอง

การประเมินปริมาณวัสดุเทกองในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันที่ได้กล่าวไปข้างต้น ส่งผลต่อการเลือกเครื่องมือในการเก็บข้อมูล ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการช่วยให้การปฏิบัติงาน มีความรวดเร็ว และเพิ่มความแม่นยำในการประเมินปริมาณได้มากขึ้น โดยมีรายละเอียดของเครื่องมือและเทคนิคประเภทต่าง ๆ ดังนี้

2.2.1 การประเมินด้วยเครื่องมือพื้นฐาน

ล้อเดิน เทปวัด การมองด้วยสายตา หรือการนับบรรทัดทุกขณะขนถ่ายสินค้า ดังแสดงดังรูปที่ 2.12 ยังคงเป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับการประเมินปริมาณในคลังเก็บสินค้า เครื่องมือเหล่านี้ใช้สำหรับการประเมินปริมาณคร่าว ๆ เท่านั้น ซึ่งเป็นการวัดความยาว ความกว้าง และความสูงด้วยตนเอง จากนั้นนำไปคูณด้วยสูตรมาตรฐานเพื่อคำนวณปริมาณ ข้อดี คือ ต้นทุนต่ำ และใช้งาน

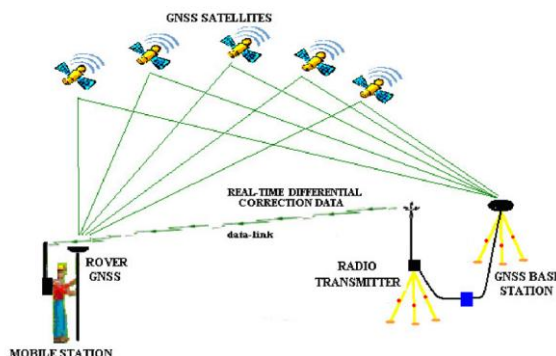
ง่าย แต่มีแนวโน้มที่จะเกิดข้อผิดพลาดจากมนุษย์ได้ง่าย ใช้เวลานาน และอาจไม่เหมาะกับรูปทรงที่ซับซ้อนสูง (Son et al., 2020)



รูปที่ 2.12 การนำรถบรรทุกขณะขนถ่ายสินค้า

2.2.2 การประเมินด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS

GNSS หรือ Global Navigation Satellite Systems เป็นระบบกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม ที่ปัจจุบันมีบทบาทสำคัญในด้านภูมิสารสนเทศ โดยการประเมินปริมาตรด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS นั้นเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งของจุดที่สนใจบนพื้นผิวของวัสดุ ทำการเก็บข้อมูลได้ที่ละจุด ตามตำแหน่งที่ตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS โดยการประเมินปริมาตรด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS สามารถแบ่งออกได้ 2 วิธี คือ การเก็บข้อมูลแบบ Real-Time Kinematic (RTK) และแบบ Post-Processed Kinematic (PPK) ได้ ซึ่งการเก็บข้อมูลแบบ RTK สามารถปรับแก้สัญญาณ GNSS ได้แบบเรียลไทม์ ช่วยให้เก็บข้อมูลได้อย่างแม่นยำระดับเซนติเมตร (Li et al., 2018) โดยปกติจะต้องมีสถานีฐาน (GNSS Base station) ที่ตั้งอยู่กับที่ ดังแสดงดังรูปที่ 2.13 เพื่ออ้างอิงตำแหน่งกับดาวเทียมที่โคจรอยู่รอบ ๆ และเครื่องรับสัญญาณ GNSS ที่สื่อสารกันแบบเรียลไทม์ ในทางกลับกัน PPK จะเก็บข้อมูล GNSS แบบดิบไว้สำหรับการประมวลผลภายหลัง ในการนำข้อมูลที่ได้มาประเมินหาปริมาตรวัสดุเทกองนั้น จำเป็นต้องมีการรวบรวมจุดข้อมูลจำนวนมาก เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการสร้างแบบจำลองสามมิติของกองวัสดุ โดยการแปลงข้อมูลจุดตำแหน่ง GNSS เป็นแบบจำลองสามมิติ มีวิธีการต่าง ๆ เช่น Triangulated Irregular Network (TIN) ถือเป็นแนวทางที่ใช้กันมากที่สุด (Du et al., 2022) อย่างไรก็ตาม เจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานจำเป็นต้องเดินเก็บข้อมูลรอบ ๆ กองวัสดุ และบางครั้งจำเป็นต้องปีนขึ้น เพื่อตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS ไว้เหนือจุดที่ต้องการ ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายด้านความปลอดภัยได้



รูปที่ 2.13 การทำงานของเครื่องรับสัญญาณ GNSS (Amaglo, 2021)

2.2.3 การประเมินด้วยกล้องประมวลผลรวม (Total station)

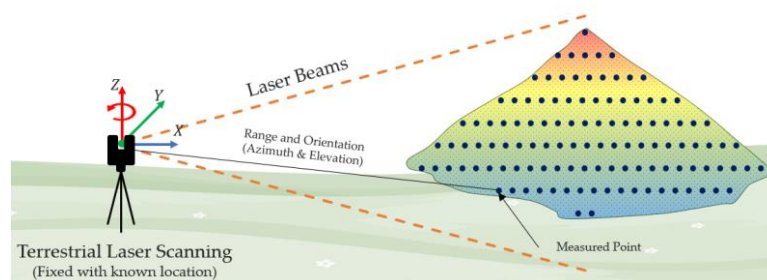
กล้องประมวลผลรวม (Total station) เป็นเครื่องมือสำรวจที่รวมความสามารถในการวัดมุมของกล้องสำรวจเข้ากับการวัดระยะทางแบบอิเล็กทรอนิกส์ (EDM) เพื่อกำหนดมุมแนวนอนมุมแนวตั้ง และความชันระหว่างจุดสองจุด โดยพิกัดของจุดที่สนใจสัมพันธ์กับพิกัดที่ติดตั้ง Total station トラบเท่าที่ยังสามารถมองเห็นแนวเส้นสายตาตรงระหว่างจุดสองจุดได้ โดยพิกัดที่ได้จากการส่องกล้อง จะเป็นระบบพิกัด (X, Y, Z) คำนวณได้โดยใช้ตรีโกณมิติ (Amaglo, 2021) การใช้ Total station ช่วยให้ประเมินปริมาตรได้ค่าความแม่นยำในระดับหนึ่ง โดยค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของจุดที่เก็บได้ ยังมีการเก็บข้อมูลตำแหน่งกระจายตัวครอบคลุมกองวัสดุมากเท่าใด ยิ่งสามารถเพิ่มความแม่นยำได้ดีขึ้น ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในช่วงหลายปีที่ผ่านมา Total station ถูกพัฒนารวมเข้ากับเครื่องรับสัญญาณ GNSS เพื่อรับตำแหน่งของดาวเทียมได้ สำหรับการใช้งานเครื่องมือนี้ ยังจำเป็นต้องใช้เจ้าหน้าที่ในการปฏิบัติงาน ซึ่งบางครั้งต้องใช้เจ้าหน้าที่ถึง 2 คน เพื่อเก็บข้อมูลตำแหน่งกองวัสดุ โดยเจ้าหน้าที่คนที่ 1 ประจำที่ Total station เพื่อส่องกล้องและบันทึกข้อมูลตำแหน่ง และเจ้าหน้าที่คนที่ 2 มีหน้าที่ในการถือเป้าปริซึมบนจุดที่สนใจ ดังแสดงดังรูปที่ 2.14 เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการเก็บข้อมูล ด้วยลักษณะการทำงานคล้ายกับเครื่องรับสัญญาณ GNSS ทำให้เจ้าหน้าที่ปฏิบัติบางครั้งต้องปีนขึ้นบนกองวัสดุ ซึ่งอาจเกิดอุบัติเหตุได้ง่าย



รูปที่ 2.14 เป้าปริซึมสำหรับใช้งานร่วมกับ Total station (กล้องสำรวจศูนย์รังสิต, 2567)

2.2.4 การประเมินด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น (TLS)

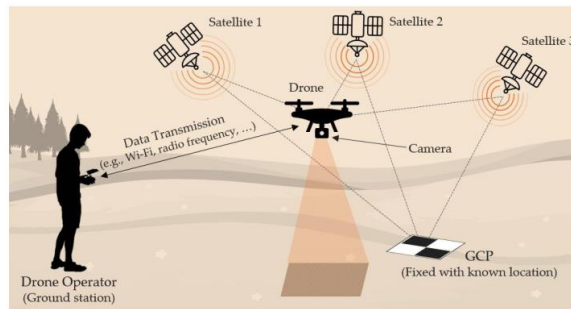
เครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น (Terrestrial laser scanners : TLS) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Terrestrial LiDAR เป็นวิธีการเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติแบบพาโนรามา 360 องศา ประกอบด้วยอุปกรณ์กำเนิดแสงเลเซอร์ กระจกหมุน อุปกรณ์ตรวจจับลำแสง และเครื่องบันทึกค่าการทำงานเริ่มจากอุปกรณ์กำเนิดแสง จะสร้างลำแสงเลเซอร์ไปยังที่กระจกหมุน โดยกระจกหมุน มีหน้าที่ในการกระจายแสงไปกระทบลงยังพื้นผิววัตถุต่าง ๆ รอบเครื่องสแกนอย่างแม่นยำ และที่เครื่องสแกนจะมีอุปกรณ์ตรวจจับลำแสงคอยแปลงพลังงานแสงให้เป็นพัลส์ โดยบันทึกไว้ในโมดูลเครื่องบันทึกค่า (Quintero et al., 2008) โดยสามารถแบ่งเซนเซอร์ของเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น ออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ใช้เซนเซอร์แบบ Passive และ Active เซนเซอร์แบบ Passive จะสามารถตรวจจับรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนหรือปล่อยออกมาจากแหล่งธรรมชาติได้ ในขณะที่เซนเซอร์แบบ Active จะตรวจจับลำแสงที่สะท้อนจากวัตถุที่ได้จากการยิงจากอุปกรณ์กำเนิดแสงเลเซอร์ที่สร้างขึ้นจากตัวเครื่องสแกนเอง ดังแสดงดังรูปที่ 2.15 เครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น มีค่าความแม่นยำระดับต่ำกว่าเซนติเมตร ซึ่งทำให้การสร้างแบบจำลองสามมิติของกองวัสดุ มีรายละเอียดสูงและใกล้เคียงกับกองวัสดุจริงมาก แต่เครื่องมือยังมีราคาสูง การประมวลผลข้อมูลอาจใช้เวลานาน และเจ้าหน้าที่ต้องมีความเชี่ยวชาญในการปฏิบัติงาน นอกจากนี้ เมื่อต้องประเมินปริมาตรกองวัสดุในคลังสินค้าขนาดใหญ่และซับซ้อน จะต้องมีการย้ายเครื่องสแกนไปตามจุดต่าง ๆ รอบกองวัสดุ เพื่อให้การสแกนเก็บข้อมูลได้ครอบคลุมพื้นที่มากที่สุดและข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติมีความหนาแน่นเพียงพอในการประเมินปริมาตร (Filkin et al., 2022) เห็นได้ชัดว่าลักษณะการปฏิบัติงานแบบนี้ อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อเจ้าหน้าที่คล้ายกับการใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS และ Total station ได้



รูปที่ 2.15 การทำงานของเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น (Alsayed and Nabawy, 2023)

2.2.5 การประเมินด้วยเทคนิค Photogrammetry

การรังวัดด้วยภาพถ่าย หรือที่เรียกว่า Photogrammetry เป็นเทคนิคการซ้อนทับภาพ 2 มิติ เพื่อคำนวณหาจุดแสดงตำแหน่งเดียวกันจากภาพถ่ายที่แตกต่างกัน แล้วนำมาสร้างเป็นแบบจำลองทอพอโลยีสามมิติ ซึ่งเรียกรวมกันว่า Structure from Motion (SfM) โดยมีการนำข้อมูลการตั้งค่างานถ่ายภาพ เช่น มุมก้มมุมเงย ระยะโฟกัสภาพ การบิดของภาพ และการเคลื่อนที่ของจุดพิกเซลอ้างอิง จะถูกนำมาประกอบการประมวลผลในการสร้างแบบจำลองสามมิติ ซึ่งจะทำให้การประเมินปริมาตรมีความถูกต้องมากขึ้น (จิรธรรมคุณ และ ชีรพล, 2018) ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา โดยนิยมใช้เทคนิค Photogrammetry ร่วมกับอากาศยานไร้คนขับ ปัจจุบันมีซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประเมินปริมาตรวัตถุทอพอโลยีจากเทคนิค Photogrammetry มากมาย เช่น Envi, Agisoft Metashape และ Bentley ContextCapture โดยซอฟต์แวร์เหล่านี้สามารถสร้างแบบจำลองสามมิติได้โดยตรง โดยอากาศยานไร้คนขับที่ใช้เทคนิค Photogrammetry ในการประเมินปริมาตรวัตถุทอพอโลยี ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการประเมินปริมาตรในคลังสินค้ากลางแจ้ง โดยเฉพาะในพื้นที่คลังเก็บสินค้าที่การเข้าถึงยาก อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การประเมินปริมาตรวัตถุทอพอโลยีมีความแม่นยำมากขึ้น จำเป็นต้องมีการปรับแก้ความถูกต้องด้วยจุดควบคุมภาคพื้น หรือที่เรียกว่า Ground control points (GCP) ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงตำแหน่งที่ทราบค่า ดังแสดงดังรูปที่ 2.16 โดยวางไว้ในพื้นที่รอบ ๆ คลังเก็บสินค้าและใช้ในการปรับขนาดแบบจำลองสามมิติ และโดยปกติการเก็บค่าตำแหน่งของ GCP จะถูกเก็บโดยใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS ดังนั้น จึงแสดงถึงข้อจำกัดที่อาจเกิดขึ้นของวิธีนี้ หากนำอากาศยานไร้คนขับไปใช้ในการประเมินปริมาตรวัตถุทอพอโลยีในอาคาร



รูปที่ 2.16 การทำงานของอากาศยานไร้คนขับ (Alsayed and Nabawy, 2023)

2.2.6 การประเมินด้วยเทคนิค SLAM

SLAM หรือย่อมาจาก Simultaneous Localization and Mapping เป็นเทคนิคที่ใช้ในวิทยาการหุ่นยนต์และการทำแผนที่ เพื่อสร้างแผนที่และระบุตำแหน่งหุ่นยนต์ไปพร้อมกัน โดยที่ระบบไม่มีข้อมูลของสิ่งแวดล้อมนั้นมาก่อน ในพื้นที่จำกัดด้วยระบบกล้อง Stereo หรือ LiDAR แบบเคลื่อนที่ สามารถใช้ SLAM เพื่อสร้างแผนที่สภาพแวดล้อมและการประเมินปริมาตรได้ ซึ่งเกิดมาจากหลักการที่ว่า เมื่อระบบมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น ระบบควรตรวจสอบสภาพแวดล้อมใหม่และระบุตำแหน่งของตนเอง พร้อมทั้งขยายข้อมูลสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่ระบบสามารถสแกนได้ไปพร้อม ๆ กัน โดยหลักการของ SLAM ณ เวลา k ใด ๆ ประกอบไปด้วยข้อมูล 4 ประเภท ดังนี้

1) เวกเตอร์สถานะ x_k อธิบายถึงตำแหน่งและทิศทางของระบบ ณ เวลา k และสามารถอธิบายในรูปแบบด้านล่าง

$$X_{0:k} = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_k\}$$

โดยจำเป็นต้องมีข้อมูล x_0 แต่ถ้าหากระบบเริ่มทำการสแกนในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีข้อมูลอยู่มาก่อน x_0 จะถูกกำหนดให้เป็นตำแหน่งอ้างอิงแทน

2) เวกเตอร์ควบคุม u_k คือ ค่าที่บอกว่าระบบอยู่ที่ตำแหน่งใดเทียบกับจุดที่เริ่มสแกน โดยได้ข้อมูลมาจาก IMU (Inertial Measurement Unit) อาจจะเป็นข้อมูลระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง หรือมีข้อมูลหลายประเภทได้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$U_{0:k} = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_k\}$$

หากระบบไม่มีสิ่งรบกวน (Noise) ข้อมูล u_k สามารถนำมาคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบ x_k ได้ แต่ในความเป็นจริงมักมีสิ่งรบกวนเสมอ ทำให้ข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนได้ง่าย

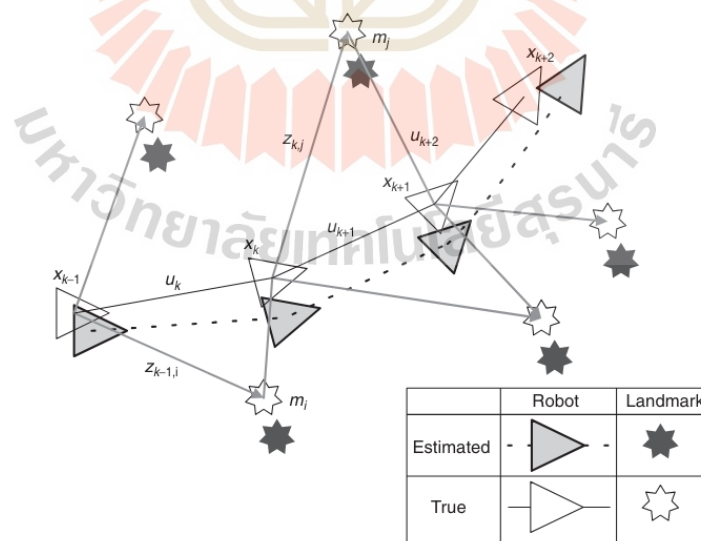
3) เวกเตอร์จุดสังเกต m_i คือ ข้อมูลที่อธิบายตำแหน่งของสภาพแวดล้อมที่ระบบสแกนได้ โดยจะเป็นข้อมูลที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$m = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_n\}$$

4) ระยะห่างระหว่างจุดสังเกตและระบบ z_{ik} ทั้งหมดที่ระบบสแกนได้ m และตำแหน่งของระบบที่เวลา k ใด ๆ x_k ซึ่งเป็นข้อมูลที่อธิบายถึงระยะห่างระหว่าง m ทั้งหมดกับระบบที่เวลา k สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$Z_{0:k} = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_k\}$$

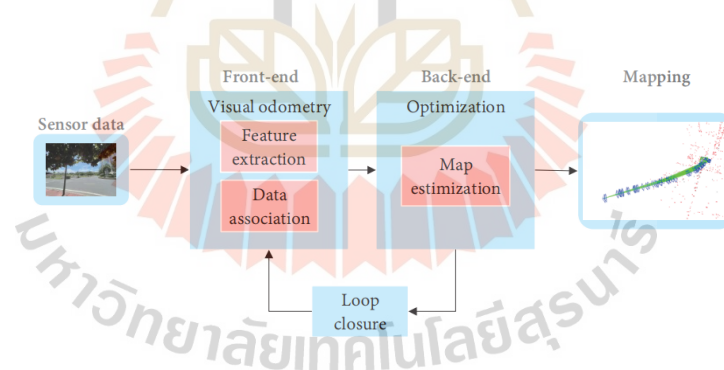
SLAM นั้นเป็นวิธีการที่ประมวลหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบ x_k และสร้างสภาพแวดล้อมสามมิติเสมือนจริง m_n โดยใช้ข้อมูล u_k และ z_k ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนี้เรียกว่า Full SLAM และอธิบายในรูป Distribution ดังแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การประมาณค่าตำแหน่งต่าง ๆ ของ SLAM (Durrant-Whyte and Bailey, 2006)

ข้อดีของ SLAM คือ สามารถเก็บข้อมูลได้แบบเรียลไทม์ ทำงานได้ดีในสภาพแวดล้อมแบบไดนามิก และสามารถเก็บข้อมูลในพื้นที่คลังเก็บสินค้าที่มีความซับซ้อนได้ โดยไม่ต้องใช้สัญญาณ GNSS อาจมีข้อจำกัดในพื้นที่คลังขนาดใหญ่ และอาจต้องใช้ระยะเวลาการประมวลผลข้อมูลเพื่อประเมินปริมาตรที่นานขึ้น โดยเทคนิค SLAM สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) Visual SLAM อาศัยกล้องในการรวบรวมข้อมูลภาพเกี่ยวกับสภาพแวดล้อม โดยจะประมวลผลรูปภาพ เพื่อแยกคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น มุม ขอบ หรือจุดสำคัญ ซึ่งจะใช้ในการสร้างแผนที่และประมาณค่าท่าทางของอุปกรณ์ ตำแหน่งและทิศทางภายในแผนที่นั้น โดยกล้องจะจับภาพและอัลกอริทึมจะแยกคุณสมบัติที่โดดเด่นจากภาพเหล่านี้ ด้วยการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างภาพที่ต่อเนื่องกัน Visual SLAM จะสร้างแผนที่ของสภาพแวดล้อม อัลกอริทึมจะประเมินตำแหน่งและการวางแนวของอุปกรณ์พร้อมกัน โดยพิจารณาจากคุณสมบัติที่ตรงกัน ดังแสดงดังรูปที่ 2.18 ข้อดี คือ กล้องมีราคาไม่แพง เมื่อเทียบกับเซนเซอร์ LiDAR โดย Visual SLAM สามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย โดยมีสภาพแสงที่แตกต่างกัน ใช้กันทั่วไปในอากาศยานไร้คนบิน และหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร (Chen et al, 2022) แต่มีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพอาจลดลงในสภาพแสงน้อย โดยค่าความแม่นยำขึ้นอยู่กับคุณภาพของการแยกคุณสมบัติและ อัลกอริทึมประมวลผลการจับคู่ภาพ

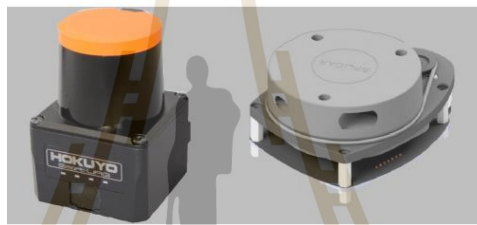


รูปที่ 2.18 Visual SLAM system framework (Chen et al., 2022)

2) LiDAR SLAM ใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับแสงและการกำหนดระยะ (LiDAR) เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมแบบสามมิติ เซ็นเซอร์ LiDAR จะยิงลำแสงและวัดเวลาที่ลำแสงจะกลับมาหลังจากกระทบวัตถุ เพื่อคำนวณหาระยะทางระหว่างเซนเซอร์กับวัตถุ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปค่าพิกัด (X, Y, Z) จำนวนมาก ซึ่งเรียกข้อมูลเหล่านี้ว่า ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ (PointClouds) โดยข้อมูลนี้จะใช้สำหรับการทำแผนที่และการแปลผลตำแหน่งของอุปกรณ์ โดยทฤษฎีที่ใช้ คือ Iterative Closest Point (ICP) เป็นกระบวนการตรวจสอบข้อมูลที่สแกนเก็บมาได้ใน 2 ช่วงเวลาว่ามีเปลี่ยนแปลงไป

อย่างไร ซึ่งในการคำนวณจะมีข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ จำนวน 1 ชุดข้อมูลเพื่อใช้อ้างอิง และอีก 1 ชุด เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของข้อมูล แล้วนำข้อมูลทั้งหมดมาต่อกันเพื่อสร้างเป็นพื้นที่ผิวของวัตถุและสภาพแวดล้อมในรูปแบบสามมิติ โดยสามารถแบ่งประเภท LiDAR ได้ดังนี้

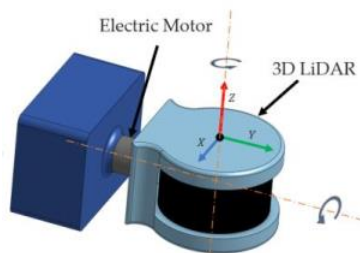
a) 2D LiDAR ทำงานโดยการปล่อยลำแสงเลเซอร์ในระนาบเดียว ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในแนวนอน เซ็นเซอร์จะสแกนสภาพแวดล้อมในระนาบ 2 มิติ เพื่อบันทึกระยะทางและมุม โดยการเปรียบเทียบการสแกนปัจจุบันกับการสแกนครั้งก่อน ระบบสามารถประมาณตำแหน่งของอุปกรณ์ได้ ข้อดี คือ ราคาถูกกว่าเซ็นเซอร์ 3D LiDAR สามารถทำแผนที่ภายในอาคารต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประมวลผลข้อมูลได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับ 3D LiDAR แต่ข้อจำกัด คือ ข้อมูลที่ได้จะแสดงสภาพแวดล้อมแบบ 2 มิติ โดยขาดข้อมูลความสูง อาจไม่เหมาะกับการทำแบบจำลองสามมิติที่ซับซ้อน (Mehendale and Neoge, 2020) ซึ่งตัวอย่างอุปกรณ์ 2D LiDAR ดังแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 2D LiDAR ยี่ห้อ/รุ่น Hokuyo URG-04LX และ RPLidar-A1 (Shamim and Jafri, 2023)

b) 3D LiDAR สามารถเก็บข้อมูลในรูปแบบสามมิติของสภาพแวดล้อมโดยรอบได้ ซึ่งช่วยให้สามารถสร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการนำข้อมูลไปประเมินปริมาตรวัสดุเทกองได้ โดยสามารถแบ่งย่อยได้อีกดังนี้

1) Mechanical LiDAR เป็นเซ็นเซอร์แบบกลไกใช้กระจกหมุน เพื่อควบคุมลำแสงเลเซอร์ไปในทิศทางต่าง ๆ โดยสแกนสภาพแวดล้อมในรูปแบบวงกลม ให้ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่มีความหนาแน่นสูง สามารถสแกนวัตถุและโครงสร้างในระยะไกลได้ กลไกการหมุนช่วยให้สามารถสแกนเก็บข้อมูลได้ 360 องศา ดังแสดงดังรูปที่ 2.20 ส่วนข้อจำกัด คือ ชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวนำอาจทำให้เกิดการสึกหรอได้ง่าย ซึ่งส่งผลต่อความน่าเชื่อถือและอัตราการสแกนช้าลงเมื่อเทียบกับ LiDAR แบบ Solid-state



รูปที่ 2.20 การทำงานของ 3D Mechanical LiDAR (Alsayed and Nabawy, 2023)

2) Solid-state LiDAR ใช้ส่วนประกอบโซลิตสแตต เช่น ระบบเครื่องกลไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro-electromechanical systems : MEMS) เพื่อบังคับทิศทางลำแสงเลเซอร์ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว ทำให้ LiDAR แบบโซลิตสแตต ทนทานและเชื่อถือมากขึ้น ขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับ LiDAR แบบ Mechanical และอัตราการสแกนที่สูงขึ้น เนื่องจากไม่มีข้อจำกัดทางกลไก แต่อาจสแกนเก็บข้อมูลได้มุมแคบกว่า (Van Nam and Gon-Woo, 2021) ซึ่งตัวอย่าง Solid-state LiDAR ดังแสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 Solid-state LiDAR ยี่ห้อ/รุ่น Livox Mid-40 (Brazeal et al., 2021)

2.2.7 การประเมินด้วยเครื่องมือเชิงพาณิชย์

ปัจจุบันมีบริษัทเอกชน เริ่มนำเทคโนโลยีและเทคนิคต่าง ๆ มาใช้ร่วมกัน เพื่อแก้ปัญหาการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้าในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งทำให้ช่วยลดข้อจำกัดของบางเทคโนโลยีได้ เช่น อากาศยานไร้คนขับที่ไม่ต้องใช้สัญญาณ GNSS เครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้นที่ยุบรวมเข้ากับเทคนิค Photogrammetry เป็นต้น ซึ่งต่อไปนี้จะ เป็นเทคโนโลยีที่มีความเกี่ยวข้องกับการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) GeoSLAM ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้ 3D LiDAR แบบ Mechanical ที่สามารถจัดทำแผนที่และประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้าได้ โดยภายในพื้นที่คลังเก็บสินค้าไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณ GNSS ระบบนี้อาศัยเทคนิค SLAM ขั้นสูงที่สามารถประมวลผล

สภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนได้ นอกจากนี้ ระบบยังใช้หน่วยประมวลผลแบบออนบอร์ด เพื่อประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ ทำให้ระบบสามารถเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งระบบนี้สามารถถือเดินด้วยมือ ดังแสดงดังรูปที่ 2.22 หรือติดตั้งบนอากาศยานไร้คนบิน เพื่อเก็บข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ (GeoSLAM, 2024)



รูปที่ 2.22 LiDAR Handheld ยี่ห้อ/รุ่น GeoSLAM ZEB Horizon (GeoSLAM, 2024)

2) Hovermap ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยี 3D LiDAR SLAM คล้ายกับ GeoSLAM ซึ่งเป็นอีกตัวอย่างของการนำเทคนิค SLAM มาใช้ในการทำแผนที่และสแกนเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ เพื่อใช้ในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้าได้ ซึ่งความพิเศษของ Hovermap คือ การออกแบบเครื่องมือให้มีความยืดหยุ่นต่อการใช้งานที่หลากหลาย สามารถถอดไปใส่ในแพลตฟอร์มอื่นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถติดตั้งไว้กับอากาศยานไร้คนบิน ยานพาหนะ เสา หรือกระเปาะเป่าสะพาน หลัง เพื่อการรวบรวมข้อมูลได้อย่างง่ายดาย ดังแสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 PLUG-AND-PLAY LiDAR ยี่ห้อ/รุ่น Hovermap ST (Hovermap, 2024)

3) Flyability ได้มีการพัฒนาอากาศยานไร้คนบินติดตั้งกล้อง Stereo และ 3D LiDAR ที่สามารถจัดทำแผนที่และเก็บข้อมูลคลังสินค้าในอาคารที่มีพื้นที่จำกัดเต็มไปด้วยฝุ่นและแสงสว่างน้อยได้ ซึ่งเหมาะกับพื้นที่อับอากาศ เช่น คลังเก็บปูนซีเมนต์ แม่ปุ๋ย หรือแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งเทคโนโลยีนี้ถูกพัฒนาขึ้นจากเทคนิค SLAM เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ โดยไม่ใช่สัญญาณ GNSS ในการนำทาง รวมไปถึงการออกแบบอากาศยานไร้คนบินให้มีโครงสร้างป้องกันอุปกรณ์ภายใน และติดตั้งไฟส่องสว่างระหว่างทำการบิน ดังแสดงดังรูปที่ 2.24 (Flyability, 2024) ซึ่งจะทำให้การใช้งานอากาศยานไร้คนบินในคลังเก็บสินค้านี้มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.24 อากาศยานไร้คนบินที่ใช้เทคนิค SLAM ยี่ห้อ/รุ่น FLYABILITY Elios 3 (Flyability, 2024)

4) ABB ได้มีการพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุในคลังเก็บสินค้าขึ้น โดยใช้เทคโนโลยี 1D LiDAR โดยยิงลำแสงเลเซอร์ไปกระทบพื้นผิวของวัสดุ และจะสะท้อนกลับไปยังตัวรับของอุปกรณ์ ดังอุปกรณ์ที่แสดงดังรูปที่ 2.25 ซึ่งจะได้ระยะเวลาที่แสงเดินทางจากพื้นผิวกลับมายังตัวรับ แล้วจึงนำไปคำนวณระยะทางระหว่างเครื่องมือกับพื้นผิว จะได้เป็นค่าพิกัด X, Y, Z ทำการสร้างแบบจำลองสามมิติของกองวัสดุจากข้อมูลที่ได้ เพื่อใช้ในการประเมินปริมาตร ซึ่งเทคโนโลยีนี้ มีข้อดีด้านต้นทุนที่มีราคาไม่แพง บำรุงรักษาได้ง่าย แต่เหมาะกับการใช้งานในคลังเก็บสินค้าขนาดเล็ก เช่น ถังไซโล โดม เป็นต้น (ABB, 2024) แต่อย่างไรก็ตาม หากต้องการสแกนเก็บข้อมูลคลังสินค้าที่มีขนาดใหญ่โดยละเอียด การเลือกใช้ 3D LiDAR จะให้คุณภาพของการสแกนเก็บข้อมูลที่ดีกว่า



รูปที่ 2.25 1D Laser Scanner System ยี่ห้อ/รุ่น ABB VM3D (ABB, 2024)

5) BinMaster ได้ทำการพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุในพื้นที่ขนาดเล็กขึ้น เช่น ในถังไซโล เป็นต้น ซึ่งใช้เทคโนโลยี Acoustics-based โดยอุปกรณ์จะส่งคลื่นเสียงความถี่ต่ำไปยังพื้นผิวของวัสดุ ทำให้เกิดเป็นเสียงสะท้อนกลับมายังเซ็นเซอร์ตัวรับดังอุปกรณ์ที่แสดงดังรูปที่ 2.26 ซึ่งสะท้อนกลับจากหลายจุดบนพื้นผิว โดยจะถูกแปลงเป็นข้อมูลตำแหน่งพิกัด X, Y, Z แล้วระบบจะนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติของวัสดุที่อยู่ในถัง โดยรวมขนาดของถังเอาไว้ด้วย เพราะจะถูกนำไปใช้ในการประเมินปริมาตรของวัสดุ ซึ่งระบบนี้เหมาะกับการใช้งานในถังเก็บสินค้าขนาดเล็ก แต่อาจไม่เหมาะกับการใช้งานในคลังเก็บวัสดุเทกองที่มีขนาดใหญ่ เพราะรูปแบบการสแกนเก็บข้อมูลคล้ายกับเทคโนโลยี 1D LiDAR ซึ่งไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดในระยะเวลาอันสั้นได้

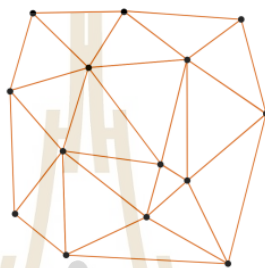


รูปที่ 2.26 Acoustics-based Level Sensor ยี่ห้อ/รุ่น BinMaster 3D Level Scanner (BinMaster, 2024)

2.3 วิธีประเมินปริมาตรด้วยเทคนิค 2.5D จากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ

การประเมินปริมาตรจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ มีความสำคัญในด้านต่าง ๆ เช่น การสำรวจที่ดิน ธรณีวิทยา และการตรวจสอบปริมาณสินค้าคงคลัง การประเมินปริมาตร 2.5D เป็นการประเมินปริมาตรผสมผสานระหว่างแบบจำลองสามมิติและพื้นที่สองมิติ โดยมีวิธีการประเมินปริมาตร 2.5D จากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ ดังนี้

2.3.1 TIN (Triangulated Irregular Network)



รูปที่ 2.27 Triangulated Irregular Network (Amaglo, 2021)

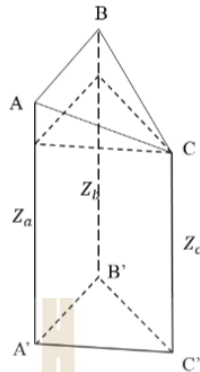
เป็นวิธีการสร้างแบบจำลองสามมิติจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ไม่ทับซ้อนกัน โดยแบ่งพื้นที่ออกเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยสามเหลี่ยมแต่ละอันจะถูกสร้างโดยจุด 3 จุด ที่อยู่ใกล้กัน และอาจมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของข้อมูล ดังแสดงดังรูปที่ 2.27 โดยจะจำลองพื้นผิววัสดุออกมาอยู่ในรูปแบบแบบจำลองสามมิติ โดยการเชื่อมต่อจุดเข้าด้วยกัน และกำหนดความสูงของสามเหลี่ยมแต่ละรูป แล้วนำมาคำนวณปริมาตรจากแบบจำลองสามมิติที่สร้างขึ้น (Amaglo, 2021) โดยมีกระบวนการ ดังนี้

- 1) Triangulation เชื่อมต่อจุดต่าง ๆ เพื่อสร้างรูปสามเหลี่ยม
- 2) Interpolation ประมาณความสูงของจุดยอดแต่ละจุดภายในรูปสามเหลี่ยม
- 3) Area Calculation คำนวณพื้นที่ฐานของสามเหลี่ยมแต่ละอัน
- 4) Volume Calculation คำนวณพื้นที่ฐานของแต่ละสามเหลี่ยมด้วยความสูงเฉลี่ย

โดยทำการแบ่งข้อมูลออกเป็นปริซึมสามเหลี่ยมหลาย ๆ อัน และทำการคำนวณปริมาตรของปริซึมแต่ละอัน ดังแสดงดังรูปที่ 2.28 แล้วจึงนำค่าปริมาตรของปริซึมแต่ละอันที่ได้มารวมกันในขั้นสุดท้าย ก็จะได้ปริมาตรของวัสดุของทั้งหมด ซึ่งการคำนวณปริมาตรปริซึมแต่ละอัน V_i ประกอบด้วยจุดพื้นผิว A, B, C และส่วนพื้นที่ฐานของที่กำหนดไว้ A', B', C' ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$V_i = \frac{1}{3} S_{A'B'C'} (Z_a + Z_b + Z_c) \quad (2.1)$$

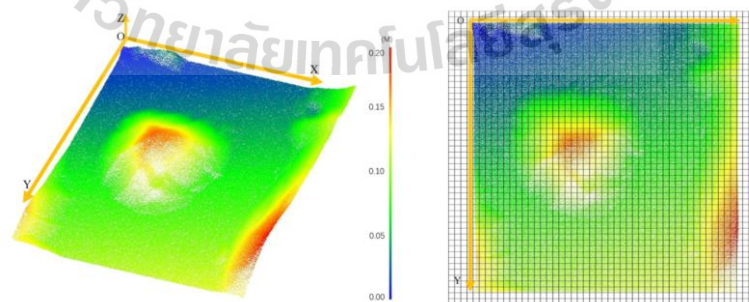
โดยที่ $S_{A'B'C'}$ คือ พื้นฐานของสามเหลี่ยม A', B', C' บนระนาบฐานของของกวด



รูปที่ 2.28 การคำนวณปริมาตรของปริซึมสามเหลี่ยมแต่ละอัน (Yang et al., 2020)

TIN ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดการบิดเบือนและแสดงถึงลักษณะพื้นผิวได้อย่างแม่นยำ เหมาะสำหรับการสร้างแบบจำลองสามมิติของวัตถุที่มีความซับซ้อน แต่อาจใช้เวลานานในการคำนวณสำหรับข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากรูปสามเหลี่ยมถูกสร้างขึ้นตามระดับความสูงที่ใกล้ที่สุด จึงอาจมีความคลาดเคลื่อนในการประเมินปริมาตรได้ง่าย หากข้อมูลมีสิ่งรบกวนมากเกินไป ตัวอย่างเช่น การสแกนเก็บข้อมูลในคลังเก็บสินค้าที่มีฝุ่นจำนวนมาก ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ได้จะมีความฟุ้งกระจาย และแบบจำลองสามมิติที่สร้างขึ้น จะมีรูปทรงลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริงได้

2.3.2 GRID

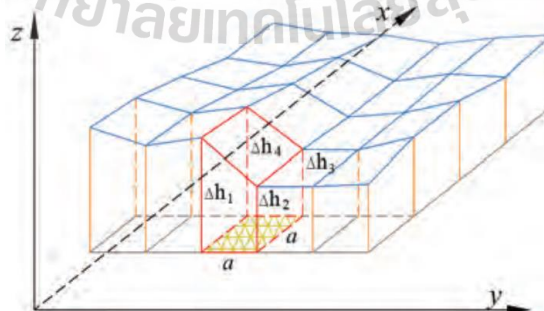


รูปที่ 2.29 กระบวนการสร้าง Grid จากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ (Yang et al., 2020)

GRID หรือตารางแรสเตอร์ แสดงข้อมูลในรูปแบบตารางที่มีขนาดสม่ำเสมอ แทนที่จะสร้างสามเหลี่ยมตามจำนวนข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่จัดเก็บมาได้ เหมือนกับกระบวนการ TIN พื้นผิวที่สร้างจากกระบวนการ GRID จะมีจำนวนเซลล์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ตามระยะห่างของ GRID ที่ต้องการ โดยแต่ละเซลล์จะเก็บค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติ เช่น ระดับความสูง ที่แสดงออกมาในรูปแบบตัวเลขต่าง ๆ ดังแสดงดังรูปที่ 2.29 โดยจะประมาณค่าความสูงเฉลี่ยจากจุดที่อยู่ภายในเซลล์แต่ละอัน และสำหรับเซลล์ที่ไม่มีข้อมูลระดับความสูง จะถูกอนุมานด้วยการประมาณค่าแบบโพลิเนียร์ของข้อมูลข้างเคียง (Yang et al., 2020) เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติที่มีพื้นผิวต่อเนื่อง ด้วยการคูณพื้นที่เซลล์ด้วยความสูงของเซลล์ โดยกระบวนการประเมินปริมาตร มีรายละเอียดดังนี้

- 1) Grid Creation สร้างตารางกริดที่ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ
 - 2) Interpolation กำหนดค่าความสูงให้กับเซลล์กริดแต่ละเซลล์ โดยอิงจากจุดใกล้เคียงหรือจุดที่ทราบค่า
 - 3) Area Calculation กำหนดระยะห่างและพื้นที่ของแต่ละเซลล์
 - 4) Volume Calculation คูณพื้นที่ฐานของแต่ละเซลล์ด้วยความสูง
- โดยทำการแบ่งข้อมูลออกเป็นปริซึมสี่เหลี่ยมหลาย ๆ อัน และทำการคำนวณปริมาตรของปริซึมแต่ละอัน ดังแสดงดังรูปที่ 2.30 แล้วจึงนำค่าปริมาตรของปริซึมแต่ละอันที่ได้มารวมกันในขั้นสุดท้าย ก็จะได้ปริมาตรของวัตถุทั้งหมด ซึ่งการคำนวณปริมาตรปริซึมแต่ละอัน V_i โดยที่ P คือ พื้นที่ของแต่ละเซลล์ (a^2) และ $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4$ คือ ความแตกต่างของความสูงระหว่างพื้นที่ฐานและพื้นผิวเปรียบเทียบกับมุมทั้ง 4 มุมของเซลล์กริด ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$V_i = \frac{1}{4} P (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.30 การคำนวณปริมาตรของปริซึมสี่เหลี่ยมแต่ละอัน (Urbančić et al., 2015)

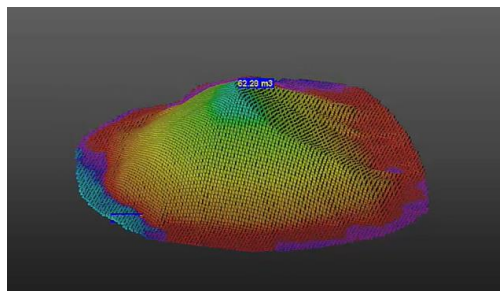
ข้อดีของการกระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติแบบ Grid คือ การประมวลผลที่มีความรวดเร็ว และสามารถเติมข้อมูลส่วนที่ขาดหายไปได้ดี ซึ่งจะทำให้แบบจำลองสามมิติของกองวัสดุมีลักษณะรูปทรงที่สม่ำเสมอ แต่ข้อมูลอาจจะถูกจำกัดรายละเอียดด้วยขนาดเซลล์ อาจสูญเสียรายละเอียดที่ซับซ้อนของกองวัสดุไป ซึ่งนำไปสู่ค่าความคลาดเคลื่อนในการประเมินปริมาตรได้ แต่มีวิธีแก้ไขเบื้องต้น คือ หากต้องการสร้างแบบจำลองสามมิติที่มีพื้นผิวตาราง Grid ระยะห่าง 1 เซนติเมตร ต้องเลือกใช้เครื่องมือที่สามารถเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ ที่มีระยะห่างระหว่างจุดน้อยกว่า 1 เซนติเมตร ก็จะสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนจากกระบวนการนี้ได้ (Equator, 2024)

2.4 ซอฟต์แวร์ในการประเมินปริมาตรจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ

ซอฟต์แวร์ในการคำนวณปริมาตรจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ มีให้เลือกใช้หลากหลาย ซึ่งมีการพัฒนาในเหมาะสมกับงานในแต่ละอุตสาหกรรมมากขึ้น เพื่ออำนวยความสะดวกในการตรวจสอบสินค้าคงคลัง และทำให้การคำนวณปริมาตรมีประสิทธิภาพและแม่นยำมากขึ้น ซึ่งซอฟต์แวร์ในการคำนวณปริมาตรจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน มีรายละเอียดหลัก ๆ ดังนี้

2.4.1 Trimble

ซอฟต์แวร์ Trimble RealWorks ใช้สำหรับการประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ โดยใช้อัลกอริทึม 2.5D ได้ 2 รูปแบบ คือ การประเมินปริมาตรโดยตรงจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ และการคำนวณความเปลี่ยนแปลงของปริมาตรโดยใช้กระบวนการ Grid ซ้อนทับ TIN (Trimble, 2024) ในกรณีที่ 1 การประเมินปริมาตรโดยตรงจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ จะใช้กระบวนการ Grid ที่สามารถปรับขนาดเซลล์ได้ หลังจากนั้นจะสร้างรูปลูกบาศก์ โดยแต่ละลูกบาศก์จะมีขนาดตามที่ตั้งค่าไว้ หากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติไม่ครอบคลุมพื้นที่ในตารางกริดทั้งหมด จะเกิดความแตกต่างของปริมาตรในเซลล์กริด ซึ่งซอฟต์แวร์นี้จะไม่สามารถทำการประมาณค่าอัตโนมัติระหว่างจุดต่าง ๆ ได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มข้อมูลส่วนดังกล่าว เพื่อให้ซอฟต์แวร์สามารถประมาณค่าในส่วนนั้นด้วย และอีกวิธีหนึ่งที่ใช้การคำนวณความเปลี่ยนแปลงของปริมาตรโดยใช้กระบวนการ Grid ซ้อนทับ TIN ซึ่งซอฟต์แวร์นี้สามารถตั้งค่าการสร้าง TIN ได้ โดยข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติจะถูกแปลงเป็น TIN สองเครือข่ายเพื่อใช้สำหรับการประเมินปริมาตร แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการประเมินปริมาตรรูปแบบนี้ ซอฟต์แวร์จะใช้กระบวนการ Grid เสริมอีกครั้ง ดังนั้น จึงถือว่าเป็นวิธีการประเมินปริมาตรแบบรวม 2 รูปแบบเข้าด้วยกัน โดยใช้ TIN เป็นแบบจำลองของพื้นผิวจริง แต่จำนวนกลุ่มจุดสามมิติที่ใช้สำหรับการประเมินปริมาตรนั้น ได้มาจากการใช้กระบวนการ Grid ฉายซ้อนทับลงบน TIN ดังแสดงดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 การประเมินปริมาตร โดยการสร้างลูกบาศก์ตามขนาดกริดที่ตั้งค่าไว้ (Trimble, 2024)

2.4.2 Atlas DMT

ATLAS DMT สามารถประเมินปริมาตรของแบบจำลองสามมิติได้ 2 รูปแบบ คือ Grid และ TIN ซึ่งกระบวนการสร้าง Grid จะประเมินปริมาตรเฉพาะพื้นที่ที่แบบจำลองสามมิติซ้อนทับอยู่ โดยตาราง Grid จะถูกสร้างขึ้นครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด และค่าระดับความสูงแต่ละเซลล์จะมาจากค่าตรงจุดศูนย์กลางของเซลล์นั้น ๆ ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณปริมาตรของปริซึมสี่เหลี่ยมแต่ละตัว โดยระดับความสูงของปริซึมแต่ละตัวถูกกำหนดจากกระบวนการ TIN และการประเมินปริมาตรอีกวิธีหนึ่ง คือ การผสมผสานของกระบวนการ TIN ในพื้นที่ทับซ้อน เนื่องจากสามเหลี่ยมเดิมที่ได้จากกระบวนการ TIN มีตำแหน่งและมุมที่ต่างกัน จึงถูกแบ่งออกเป็นสามเหลี่ยมเล็กที่มีพื้นที่ฐานตรงกัน โดยความสูงของจุดยอดปริซึมสามเหลี่ยมเดิมถูกกำหนดให้เป็นความแตกต่างของระดับความสูงของจุดยอดของปริซึมสามเหลี่ยมใหม่ หลังจากนั้นคำนวณหาผลรวมของปริมาตรของปริซึมสามเหลี่ยมใหม่ทั้งหมด ก็จะได้ปริมาตรของแบบจำลองสามมิติที่ต้องการ (Atlas, 2024)

2.4.3 Leica Cyclone

Leica Cyclone ใช้วิธีการสร้างปริซึมสามเหลี่ยมในการประเมินปริมาตร ปริซึมสามเหลี่ยมใหม่ จะถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการ TIN คล้ายกับวิธีที่ 2 ที่ใช้ในซอฟต์แวร์ Atlas DMT ซึ่งการสร้างปริซึมสามเหลี่ยมขึ้นใหม่จำนวนมากนี้ ทำให้ระยะเวลาในการประมวลผลข้อมูลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อสร้างแบบจำลองสามมิติ จะสามารถกำหนดจำนวนจุดข้อมูลสำหรับการสร้าง TIN ได้ โดยการตั้งค่าพื้นฐานจะแสดงจุดข้อมูล จำนวน 500,000 จุด ซึ่งจำนวนจุดข้อมูลที่แนะนำสูงสุดในซอฟต์แวร์นี้ คือ 2,000,000 จุด (Leica, 2024) และเป็นไปได้ที่จะสร้างแบบจำลองสามมิติที่มีจำนวนกลุ่มจุดข้อมูลสามมิติที่มากกว่า แต่เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาการประมวลผล มักจะใช้เวลาหลายชั่วโมงในการประมวลผล ซึ่งไม่แนะนำให้ใช้เกินจำนวนที่กำหนดไว้ (Stroner et al., 2019)

2.4.4 CloudCompare

เป็นซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์ส ไม่มีค่าใช้จ่าย เหมาะสำหรับการนำมาศึกษาและทำวิจัย ซึ่งช่วยให้สามารถจัดการข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติได้หลากหลาย เช่น การแปลงข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ

การกรอง การจัดหมวดหมู่ หรือการเปรียบเทียบระหว่างกัน ฯลฯ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการประเมินปริมาตร ทั้งในระนาบที่กำหนดเองและระนาบของข้อมูลอื่นได้ สำหรับการใช้งานซอฟต์แวร์ CloudCompare ในการประเมินปริมาตร ขั้นตอนแรก คือ การแปลงข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติให้อยู่ในรูปตาราง Grid โดยแยกด้วยค่าระยะห่างระหว่างกริดที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นเซลล์สี่เหลี่ยมในระนาบ XY (หรือสามารถใช้ระนาบ XZ หรือ YZ ได้) จากนั้นซอฟต์แวร์จะประมาณค่าระดับความสูงเฉลี่ยจากทุกจุดในเซลล์สี่เหลี่ยม ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติในเซลล์อยู่เลย การประมาณค่าระดับความสูงสามารถกำหนดให้เป็นค่าต่ำสุดจากเซลล์ทั้งหมด ค่าเฉลี่ยจากเซลล์ทั้งหมด ค่าที่กำหนดเอง หรือการประมาณค่าจากเซลล์รอบ ๆ ได้ การประเมินปริมาตรในซอฟต์แวร์นี้ได้จาก การนำระดับความสูงของพื้นผิวในแต่ละเซลล์คูณด้วยค่าพื้นที่ฐานของเซลล์นั้น ๆ เพื่อให้ได้ค่าความแตกต่างเชิงปริมาตรของปริซึมแต่ละอัน แล้วจึงนำมาหาค่าผลรวมของค่าปริมาตรของปริซึมทั้งหมด (CloudCompare, 2024)

จากการศึกษาของ Stroner et al. (2019) ทำการเปรียบเทียบซอฟต์แวร์การประเมินปริมาตรจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติข้อมูล ที่ได้จากการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้นในเหมือนหิน เสริมด้วยการสำรวจด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS โดยเปรียบเทียบซอฟต์แวร์ที่ใช้ทั้งกระบวนการ TIN และ Grid ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้การประเมินปริมาตรด้วยซอฟต์แวร์ Atlas DMT ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับซอฟต์แวร์ CloudCompare แต่ใช้ระยะเวลาการประมวลผลนานกว่า CloudCompare ถึง 10 เท่า อย่างไรก็ตาม กระบวนการ Grid และ TIN ให้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรที่ใกล้เคียงกัน ในขนาดเซลล์กริดเริ่มต้นไปจนถึงขนาด 1 เมตร อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างที่เห็นได้ชัด คือ ระยะเวลาในการประมวลผล โดยทั่วไปกระบวนการ Grid จะเร็วกว่า TIN อย่างมาก หากลดจำนวนกลุ่มจุดสามมิติลง เวลาที่อาจจะใกล้เคียงกันสำหรับอัลกอริทึมทั้งสองประเภท โดยมีค่าความแม่นยำของปริมาตรลดลงเล็กน้อยเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะการประเมินปริมาตร การใช้ซอฟต์แวร์ CloudCompare ที่เป็นซอฟต์แวร์ที่ไม่มีค่าใช้จ่ายก็เพียงพอสำหรับการทำวิจัย และให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การใช้โดรน

Gago et al. (2021) ทำการพัฒนาอากาศยานไร้คนบินติดตั้ง 3D LiDAR (Velodyne VLP 16 Puck Lite) เพื่อประเมินปริมาตรปุ๋ยและอาหารสัตว์ในคลังเก็บสินค้าในประเทศบราซิล โดยทั่วไปการประเมินปริมาตรวัสดุจะใช้เจ้าหน้าที่ในการตรวจวัด ซึ่งใช้เวลานานและการประเมินปริมาตรไม่แม่นยำ ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของเจ้าหน้าที่อีกด้วย เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ จึงมีการพัฒนาระบบอากาศยานไร้คนบินขึ้น โดยติดตั้งเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสง (LiDAR) เพื่อให้นำ

ทางภายในคลังสินค้า และจัดเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติขณะที่เคลื่อนที่ผ่านคลังสินค้า จากนั้นข้อมูลจะถูกนำมาสร้างแบบจำลองสามมิติของสภาพแวดล้อมคลังสินค้า ช่วยให้ระบบสามารถสร้างแบบจำลองข้อมูลสามมิติของกองวัสดุต่าง ๆ และคำนวณปริมาตรได้ โดยระบบมีความแม่นยำในการประเมินปริมาตรสูงถึง 98% ด้วยความแม่นยำระดับนี้ แสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการเปลี่ยนขั้นตอนการประเมินปริมาตรสินค้าคงคลังแบบแมนนวล ช่วยเพิ่มความแม่นยำและความปลอดภัยได้อย่างมาก ขณะเดียวกันก็ลดเวลาและต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการจัดการสินค้าคงคลังอีกด้วย

Alsayed et al. (2021, 2022) ได้นำเสนอแนวทางการจับคู่การสแกนแบบใหม่ โดยใช้อัลกอริทึมจุดที่ใกล้ที่สุดแบบวนซ้ำ (Iterative Closest Point algorithm) ซึ่งใช้การสแกนที่มีอัตราการสแกนต่ำและมีความหนาแน่นต่ำจากเซนเซอร์ 3D LiDAR แบบหมุนติดตั้งเข้ากับอากาศยานไร้คนบิน โดยใช้เพียงข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติในแนวนอนจากเซนเซอร์ เพื่อสร้างแผนที่สามมิติของคลังเก็บสินค้าแบบเรียลไทม์ โดยวิธีการนี้ได้รับการทดสอบโดยการสร้างแบบจำลองสามมิติของโรงงานปูนซีเมนต์ และประเมินปริมาตรสินค้าที่เก็บไว้ในพื้นที่นั้น โดยปริมาตรของสินค้าที่ประเมินได้จากระบบนี้ มีความแม่นยำสูงถึง 97%

Kumar et al. (2022) ทำการพัฒนาโมเดลปัญญาประดิษฐ์ในการประเมินปริมาตรกองทราย โดยใช้กล้องสเตอริโอ (ZED Mini stereo camera) จำนวน 1 ตัว ติดตั้งเข้ากับอากาศยานไร้คนบิน สำหรับการเก็บข้อมูลลักษณะกองวัสดุแบบไดนามิก โดยงานวิจัยนี้แนะนำการใช้เทคโนโลยี Deep Learning ร่วมกับ Edge Computing เพื่อประเมินปริมาตรกองวัสดุ มีความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ระหว่าง 90.2-98.8% โดยค่าความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาดกองวัสดุ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับสถานการณ์ต่าง ๆ ได้ เช่น การทำเหมือง เป็นต้น

ใช้ 1D LiDAR ติดตั้งเข้ากับอากาศยานไร้คนบิน สำหรับการประมาณปริมาณวัสดุในคลังสินค้า มีการวิเคราะห์เส้นทางการบินเก็บข้อมูลที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวางจุดควบคุมไว้ให้ใกล้กับผนังคลังเก็บสินค้านั้น ส่งผลให้สามารถเพิ่มความแม่นยำในการประเมินปริมาตรได้ แต่อาจส่งผลต่อการสแกนเก็บข้อมูลของ LiDAR โดยมีค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ที่ 98.4% และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ 2D และ 3D LiDAR พบว่าระบบ 1D LiDAR ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถลดการใช้พลังงานและต้นทุนการพัฒนาระบบน้อยลง ทำให้เป็นตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับการประเมินปริมาตรคลังสินค้า

2.5.2 การติดตั้งบนเสาหรือคาน ภายในคลังสินค้า

de Lima and Costa (2021) ทำการทดลองใช้ 2D LiDAR (OMD30M-R2000) แบบตั้งอยู่กับที่ เพื่อประเมินปริมาตรของกองเมล็ดข้าวโพด จำนวน 2 กองเปรียบเทียบกัน โดยได้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ที่ 80.4-98.5% ซึ่งค่าความแม่นยำที่ได้ มีความสัมพันธ์กับความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของกองวัสดุ

Manish et al. (2022) ได้ทำการพัฒนาระบบการตรวจสอบและการรายงานคลังสินค้า (SMART) ขึ้น ซึ่งเป็นการรวมอุปกรณ์กล้อง (GoPro Hero 9 RGB) และ 3D LiDAR (Velodyne VLP-16) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งไว้บนเสาเหนือคลังเก็บสินค้า เพื่อเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติสภาพแวดล้อมในคลังเก็บเกลือ โดยรวบรวมข้อมูลการสแกนที่มุมแตกต่างกัน เพื่อจัดการกับลักษณะการวางสินค้าที่กระจายในคลัง มีการใช้เทคนิคการลงทะเบียนข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติแบบหยาบโดยใช้ข้อมูลรูปภาพที่ได้จากกล้องและกลุ่มจุดสามมิติที่ได้จาก 3D LiDAR ตามด้วยเทคนิคการลงทะเบียนแบบละเอียด เพื่อปรับให้ข้อมูลมีความถูกต้อง แล้วจึงนำไปประเมินปริมาตร และมีการสอบเทียบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรกับเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (TLS) โดยแสดงให้เห็นถึงค่าความแม่นยำสัมพัทธ์สูงถึง 99%

Mahlberg et al. (2022) ได้ทำการศึกษาต่อยอดจากงานวิจัยของ Manish และคณะ (2022) โดยการนำระบบ SMART ที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบประเมินปริมาตรในคลังเก็บเกลือมากกว่า 90 ครั้ง ในโรงงาน 30 แห่ง แสดงให้เห็นถึงค่าความแม่นยำมากกว่า 99.9% ในการประเมินปริมาตร ทำให้หน่วยงานที่นำระบบนี้ไปใช้มีวิธีการที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการกำหนดปริมาณเกลือในคลัง และระบบนี้ยังสามารถติดตั้งแบบถาวรได้ ซึ่งจะช่วยให้สามารถประเมินปริมาตรตามรอบเวลาได้อีกด้วย

2.5.3 การติดตั้งบนระบบราง

Zhang et al. (2011) ได้เสนอวิธีการหารูปทรงของคลังสินค้า โดยใช้กล้องจำนวน 2 ตัว และเครื่องฉายภาพติดตั้งบนรางเลื่อน เพื่อจับภาพและสร้างรูปทรงสามมิติของกองวัสดุ โดยระบบนี้แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการประเมินปริมาตรและวิเคราะห์รูปทรงได้อย่างแม่นยำ แม้ว่าวิธีการนี้จะได้เปรียบในด้านประสิทธิภาพและความแม่นยำ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการประเมินปริมาตรแบบดั้งเดิม แต่ก็ไม่ได้บอกถึงค่าความแม่นยำว่าเป็นเท่าใด และข้อจำกัดในด้านสภาพแวดล้อมบางอย่าง เช่น แสงไม่ดีหรือพื้นผิวที่ซับซ้อน

Zhao et al. (2012) ทำการศึกษากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองรูปทรงสามมิติของกองแร่เหล็กขนาดเล็ก โดยใช้ระบบรางเลื่อนติดตั้ง 2D LiDAR (SICK LMS200) จำนวน 1 ตัว และเซนเซอร์วัดระยะ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการประเมินปริมาตรกองวัสดุ อยู่ระหว่าง 96.2-99.4% ซึ่งความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาดกองวัสดุที่ใช้ในการวิจัย หากกองวัสดุมีขนาดเล็ก ค่าความแม่นยำของการประเมินปริมาตรของระบบนี้จะลดลงตามไปด้วย และการวิจัยนี้ยังระบุว่าการประเมินปริมาตรของระบบนี้ใช้ระยะเวลามากกว่าการสร้างแบบจำลองสามมิติถึง 5 เท่า

Xu et al. (2022) ได้นำเสนอระบบรางเลื่อนที่ติดตั้ง 2D LiDAR (SICK LMS-141) จำนวน 2 ตัว และเซนเซอร์วัดระยะ เพื่อลดข้อจำกัดด้านต้นทุนและการเข้าถึงเครื่องสแกนเลเซอร์

แบบภาคพื้น (TLS) สำหรับการประเมินปริมาตรสินค้าคงคลังของเหมืองทองและทองแดง โดยระบบนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการใช้งานแบบรอบเวลาที่เหนือกว่าเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น โดยสอบเทียบความแม่นยำกับ GeoSLAM scanner มีความแม่นยำสูงถึง 99.9% ด้วยการรวมข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติจาก 2D LiDAR จำนวน 2 ตัว ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความครบถ้วนสมบูรณ์ ทำให้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ สำหรับการประเมินปริมาตรสินค้าแบบเรียลไทม์

จากการศึกษาของ Alsayed and Nabawy (2023) ได้สรุปทิศทางในอนาคตสำหรับการพัฒนาระบบประเมินปริมาตรในคลังสินค้าไว้อย่างน่าสนใจ ดังนี้ การพัฒนาระบบเกี่ยวกับการประเมินปริมาตรวัสดุในคลังสินค้าในอาคาร ทำให้มีโอกาสนในการปรับปรุงประสิทธิภาพ ความถูกต้อง และความปลอดภัยในการจัดการคลังสินค้า การควบคุมสินค้าคงคลัง และความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงาน โดยเทคโนโลยีและเทคนิคต่าง ๆ ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานประเมินปริมาตรในอาคารมากขึ้น เช่น เทคโนโลยี LiDAR, เทคนิค SLAM, อากาศยานไร้คนขับ และเซ็นเซอร์วัดระยะ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีเหล่านี้ มักเป็นเทคโนโลยีเชิงพาณิชย์ มีราคาสูง มีกรรมสิทธิ์ และไม่เปิดเผยข้อมูลการพัฒนาต่อสาธารณะ ทำให้เกิดอุปสรรคในการนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย มีงานวิจัยเพียงไม่กี่ชิ้นที่ทำการศึกษารวบรวมข้อมูลโดยใช้ LiDAR ที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับและบนขาตั้ง ซึ่งวิธีการเหล่านี้ มีความยุ่งยากและอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงด้านความปลอดภัยเมื่อปฏิบัติงานภายในพื้นที่จำกัด และการติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลต่าง ๆ บนขาตั้งหรือห้อยบนมาจากคาน แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำสูง แต่อาจมีข้อจำกัดในเรื่องการเคลื่อนย้ายระหว่างคลังสินค้าได้

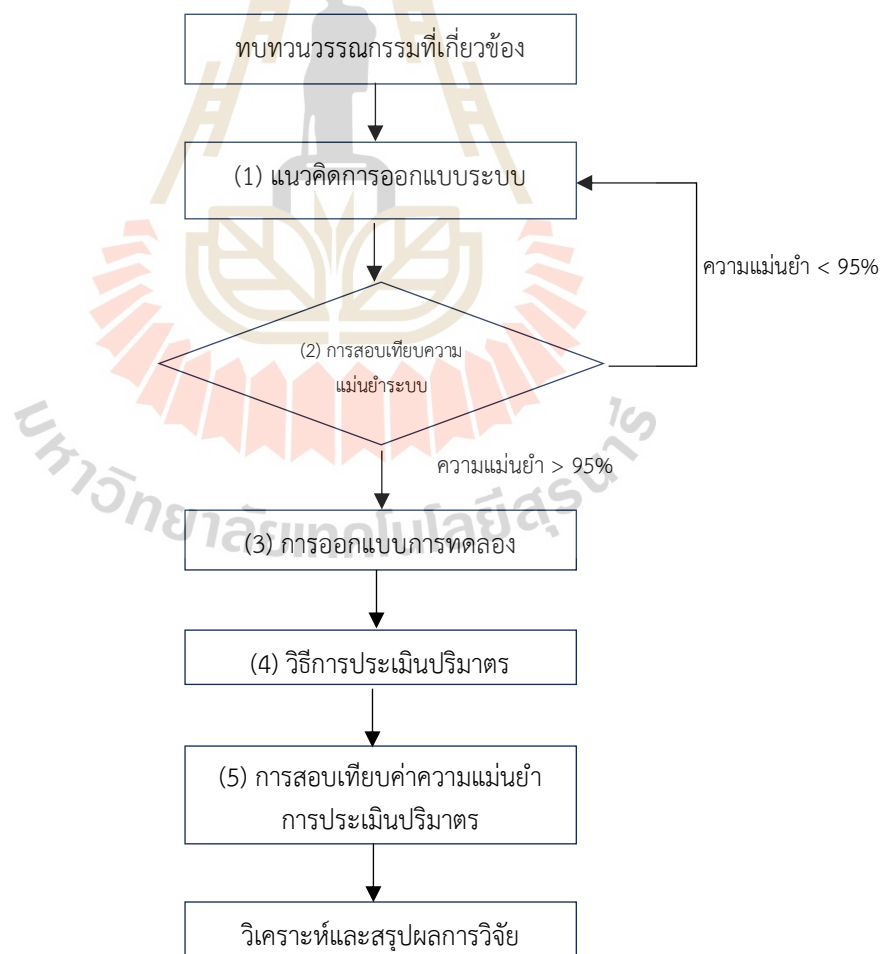
จากการทบทวนวรรณกรรมและแหล่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียด ทำให้มองเห็นโอกาสในการพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง ด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติขึ้น เพื่อลดข้อจำกัดของเครื่องมือต่าง ๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง และความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานในการบริหารจัดการคลังสินค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

บทนี้นำเสนอวิธีการดำเนินการวิจัยการพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ มีระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย (1) แนวคิดการออกแบบระบบ (2) การสอบเทียบความแม่นยำระบบ (3) การออกแบบการทดลอง (4) วิธีการประเมินปริมาตร และ (5) การสอบเทียบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรของระบบ โดยมีรายละเอียด ดังแสดงดังรูปที่ 3.1

3.1 กรอบการวิจัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

(1) แนวคิดการออกแบบระบบ กระบวนการในการพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ ตั้งแต่ลำดับการทำงาน คุณสมบัติของระบบ อุปกรณ์ เซนเซอร์ และซอฟต์แวร์ที่ใช้ เพื่อให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

(2) การสอบเทียบความแม่นยำระบบ สอบเทียบการเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ ด้วยกล่องที่ทราบปริมาตร ก่อนการนำไปใช้เก็บผลการทดลองจริง เพื่อตรวจสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุให้ได้มากกว่า 95%

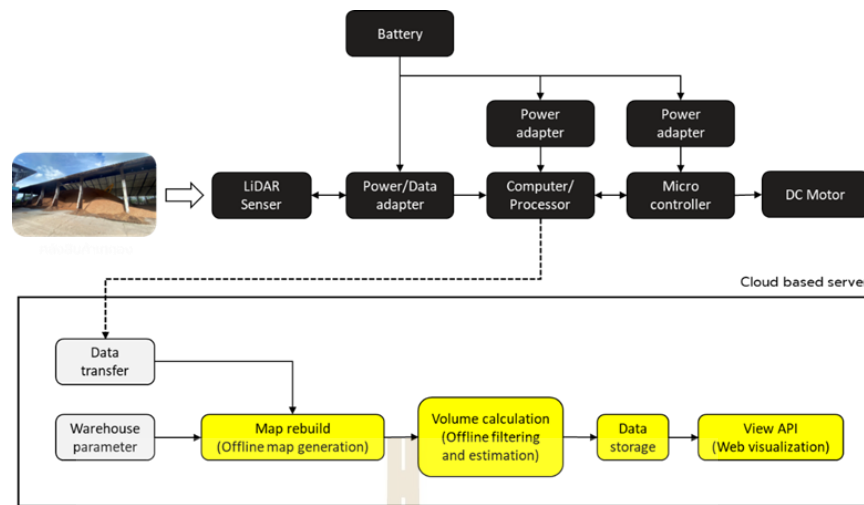
(3) การออกแบบการทดลอง ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ โดยตัวแปรอิสระ ได้แก่ ปริมาตรของวัสดุ ความเร็วในการเคลื่อนที่ และมุมสแกนของระบบ ตัวแปรตาม คือ ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุ โดยมีการเก็บข้อมูลซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร

(4) วิธีการประเมินปริมาตร กำหนดขั้นตอนการจัดการข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ได้จากระบบ ตั้งแต่การจัดระนาบข้อมูลให้อยู่ในแนวแกนที่กำหนดไว้ กำจัดข้อมูลสิ่งรบกวนที่ไม่ต้องการออกไป จนถึงการคำนวณหาปริมาตรของวัสดุแบบ 2.5D ด้วยวิธีการ Grid โดยใช้โปรแกรม CloudCompare

(5) การสอบเทียบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรของระบบ ทำการสอบเทียบข้อมูลกับเครื่องสแกนเรเซอร์แบบภาคพื้น ยี่ห้อ/รุ่น FARO Focus และหาค่าความแม่นยำสัมพัทธ์ของปริมาตรที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นกับค่าปริมาตรจากเครื่องมือที่ใช้ในการสอบเทียบ

3.2 แนวคิดการออกแบบระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง

การออกแบบระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ มีแนวคิดการออกแบบโดยนำข้อดีของ 3D LiDAR แบบ Solid-State และระบบรางที่ขับเคลื่อนด้วยชุดมอเตอร์แรงบิดสูง ควบคุมการทำงานด้วย Micro controller ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กมาพัฒนาร่วมกัน ดังแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจะทำให้การสแกนเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติของกองวัสดุในคลังเก็บสินค้ามีความรวดเร็ว และข้อมูลที่ได้มีคุณภาพ รวมไปถึงเครื่องมือมีน้ำหนักเบา สามารถนำไปติดตั้งในคลังสินค้าได้อย่างปลอดภัย โดยแนวคิดการออกแบบเครื่องมือแยกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้



รูปที่ 3.2 แนวคิดการออกแบบระบบ

3.2.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์

ฮาร์ดแวร์เป็นส่วนสำคัญในการทำหน้าที่เก็บข้อมูล ซึ่งการเลือกใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างเหมาะสม จะทำให้การสแกนเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติในคลังเก็บสินค้าตรงตามวัตถุประสงค์ และสามารถประหยัดต้นทุนการพัฒนาระบบได้

ส่วนอุปกรณ์เก็บข้อมูล

1) หน่วยประมวลผล เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบที่จะพัฒนา ใช้เพื่อสั่งการเซนเซอร์ LiDAR สแกนเก็บข้อมูลและหยุดการทำงานของระบบ การเลือกใช้คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Mini PC) ที่มีน้ำหนักเบา และมีความเร็วในการประมวลผลข้อมูลเพียงพอ จะทำให้การทำงานของระบบสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่เลือกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Intel NUC Gen 11 ดังแสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมีข้อดีในเรื่อง น้ำหนักที่เบา และมีขนาดกะทัดรัด เหมาะสำหรับการนำมาพัฒนาระบบประเมินปริมาณที่จะถูกติดตั้งอยู่บนโครงสร้างราง ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ ของ Intel NUC Gen 11 ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 Mini PC ยี่ห้อ/รุ่น Intel NUC Gen 11

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของ Mini PC ยี่ห้อ/รุ่น Intel NUC Gen 11

Model	Intel NUC Gen 11
Input Voltage	DC: 12~20 V
Processor	Intel® Core™ i7-1165G7
Processor cores	4
Processor threads	8
Processor lithography	10 nm
Processor boost frequency	4.7 GHz
Processor cache	12 MB
Thermal Design Power (TDP)	28 W
RAM	16 GB DDR4-3200
Memory voltage	1.2 V
Storage	SSD M2 500 GB
Weight	16.49 lbs.
Dimensions	31.73" x 9.29" x 5.43"
Power supply	28 W
Wi-Fi standards	Wi-Fi 6 (802.11ax)
LAN controller	Intel I225-LM
USB 2.0 ports quantity	1
USB 3.2 Gen 1 (3.1 Gen 1) Type-A ports quantity	3
HDMI ports quantity	2
Ethernet LAN (RJ-45) ports	1
Internal USB 2.0 ports quantity	2
DisplayPorts quantity	1
Thunderbolt ports quantity	2

2) เซนเซอร์วัดระยะด้วยแสง เลือกใช้เป็น 3D LiDAR แบบ Solid-state ยี่ห้อ Livox รุ่น Avia ดังแสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งมีมุมมองการสแกน (FoV) กว้างทั้งในแนวนอนและแนวตั้งถึง

70 องศา AVIA Livox สามารถตรวจจับวัตถุได้ในระยะไกลมากถึง 450 เมตร ภายใต้สภาพแสงน้อย รวมไปถึงอุปกรณ์กลไกภายในต่าง ๆ ที่มีจำนวนน้อยชิ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานนานกว่า LiDAR แบบ Mechanical ดังนั้น จึงสามารถนำมาพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังสินค้า ที่มีต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพสูงได้ โดยเซนเซอร์วัดระยะด้วยแสง Livox Avia มีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.4 Solid-state LiDAR ยี่ห้อ/รุ่น Livox Avia

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเซนเซอร์วัดระยะด้วยแสง Livox Avia

Model	Avia
Laser Wavelength	905 nm
Laser Safety	Class 1(IEC 60825-1:2014)(safe for eyes)
Detection Range(@100 klx)	190 m @10% reflectivity
	230 m @20% reflectivity
	320 m @80% reflectivity
Detection Range(@0 klx)	190 m @10% reflectivity
	260 m @20% reflectivity
	450 m @80% reflectivity
FOV	Non-repetitive scanning pattern: 70.4° (horizontal) ×77.2° (vertical)
	Repetitive scanning pattern: 70.4°(horizontal) ×4.5° (vertical)
Distance Random Error	1 σ (@ 20 m) < 2 cm
Angular Random Error	1 σ < 0.05°
Beam Divergence	0.03° (Horizontal) ×0.28° (Vertical)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเซนเซอร์วัดระยะด้วยแสง Livox Avia (ต่อ)

Model	Avia
Point Rate	240,000 points/s (first or strongest return)
	480,000 points/s (dual return)
	720,000 points/s (triple return)
Data Latency	≤ 2 ms
Data Port	100 Mbps Ethernet
Data Synchronization	IEEE 1588-2008 (PTP v2), PPS (Pulse Per Second), GPS
False Alarm Ratio (@100 klx)	< 0.0003%
IMU	Built-in IMU model: BMI088
Operation Temperature Range	-20° to 65° C (-4° to 149° F)
Storage Temperature Range	-40° to 85° C (-40° to 185° F)
IP Rating	IP67
Power	Repetitive scanning pattern: 9 W (Startup: 16 W)
	Non-repetitive scanning pattern: 8 W (Startup: 16 W)
Power Supply Voltage Range	Livox Avia: 10~15 V DC (recommended 12 V DC and 30 W or higher)
	Livox Converter 2.0: 9 ~ 30 V DC
Noise	40 cm omnidirectional < 45 dBA
Dimensions	91x61.2x64.8 mm
Weight	Approx. 498 g (without cables)

3) แบตเตอรี่ เป็นอุปกรณ์เก็บและจ่ายพลังงานให้แก่หน่วยประมวลผลและเซนเซอร์ LiDAR รวมไปถึงชุดขับเคลื่อนบนโครงสร้างราง ซึ่งออกแบบระบบให้สามารถทำงานติดต่อกันได้สูงสุด 4 ชั่วโมง พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ โดยเลือกใช้แบตเตอรี่ ยี่ห้อ/รุ่น Makita BL1850B ดังแสดงดังรูปที่ 3.5 ซึ่งมีฟังก์ชันการจัดการพลังงานไฟฟ้าในตัว ได้แก่ ระบบป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร ไฟแสดงระดับพลังงานไฟฟ้าคงเหลือของแบตเตอรี่ ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของระบบโดยตรง โดยแบตเตอรี่ ยี่ห้อ/รุ่น Makita BL1850B มีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.5 แบตเตอรี่ ยี่ห้อ/รุ่น Makita BL1850B

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ ยี่ห้อ/รุ่น Makita BL1850B

Model	Makita BL1850B
Capacity	5.0 Ah
Voltage	18 V
Battery type	Lithium-Ion
Energy	90 Wh
Net Weight	680 g
Charge time	45 min

ส่วนขับเคลื่อนบนรางอัตโนมัติ

1) หน่วยควบคุมการทำงาน ใช้บอร์ดควบคุมการทำงานด้วย Relay 3 ตัว ผ่านสัญญาณ WiFi ดังแสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งควบคุมการทำงานของมอเตอร์แรงบิดสูงในการขับเคลื่อนบนรางแขวน มีข้อดีในเรื่องการส่งคำสั่งการทำงานของระบบได้จากอุปกรณ์เคลื่อนที่ เช่น คอมพิวเตอร์พกพา หรือ โทรศัพท์มือถือ ทำให้การทำงานของระบบมีความสะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยบอร์ด Relay จะควบคุมรูปแบบการทำงานได้ 3 สถานะ คือ 1) เริ่มต้นการทำงาน 2) หยุดการทำงานเมื่อได้รับสัญญาณจาก Limit switch และ 3) สลับทิศทางการเคลื่อนที่ โดยคุณสมบัติต่าง ๆ ของหน่วยควบคุมการทำงานส่วนขับเคลื่อนบนราง ดังแสดงในตารางที่ 3.4

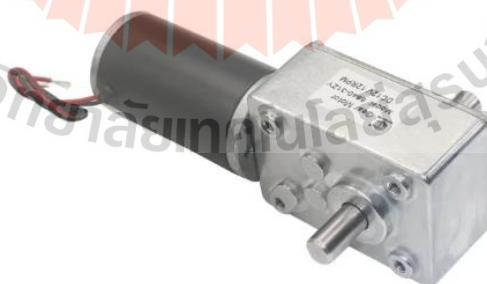


รูปที่ 3.6 บอร์ดควบคุม Relay ยี่ห้อ/รุ่น DIYMore ESP-12F

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของบอร์ดควบคุม Relay ยี่ห้อ/รุ่น DIYMore ESP-12F

Model	ESP8266 WIFI
Input	7-30 VDC/90-250 VAC
Relay Port	4 channels (5 V)
Dimension	93 x 87 mm

2) ชุดมอเตอร์แรงบิดสูง 2 เฟลา ยี่ห้อ/รุ่น ZWL 31ZY 74i ดังแสดงดังรูปที่ 3.7 ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนระบบให้สามารถเคลื่อนที่ไปตามโครงสร้างรางได้ ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ทำความเร็วได้ตั้งแต่ 2 ถึง 30 เซนติเมตรต่อวินาที โดยบรรทุกน้ำหนักได้สูงสุด 15 กิโลกรัม โดยคุณสมบัติของมอเตอร์แรงบิดสูง 2 เฟลา มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.7 มอเตอร์แรงบิดสูง 2 เฟลา

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของมอเตอร์แรงบิดสูง 2 เฟลา

Model	ZWL 31ZY 74i
Input	12 VDC
RPM	100
Max. Torque	25 Kg.cm
Stall Current	6.5 A
Shaft Dimension	Ø8 mm

ทำการประกอบอุปกรณ์แต่ละส่วนเข้าด้วยกัน โดยบรรจุลงในกล่องอลูมิเนียมขนาด 30 x 45 x 35 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ที่มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบา ทำการติดตั้งตำแหน่งของเซนเซอร์ LiDAR ให้อยู่กึ่งกลางด้านหน้าของกล่อง ดังแสดงดังรูปที่ 3.8 เพื่อเพิ่มมุมมองในการสแกนเก็บข้อมูลและยังสามารถปรับองศาการก้ม/เงยของเซนเซอร์ได้ โดยมุมการสแกนอยู่ระหว่าง 0 ถึง 90 องศา หลังจากนั้นทำการทดสอบเคลื่อนที่บนโครงสร้างรางแขวนอลูมิเนียมขนาด 1 นิ้ว ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ตามความเร็วที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.8 ชุดกล่องระบบเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติด้วย Solid-state LiDAR

3.2.2 การออกแบบซอฟต์แวร์

ซอฟต์แวร์ เป็นส่วนที่สำคัญในการจัดเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ได้จากการสแกน ซึ่งส่งผลต่อค่าความแม่นยำในการนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง โดยอัลกอริทึมที่ใช้เป็นพื้นฐานของเทคโนโลยีการพัฒนาหุ่นยนต์ ROS (Robot Operating System) ซึ่งเป็น

ระบบปฏิบัติการแบบ Open Source ที่มีชุดคำสั่งต่าง ๆ โดยรายละเอียดการออกแบบซอฟต์แวร์ที่ใช้ในระบบการจัดเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้ ดังนี้

1) การตั้งค่าพื้นฐานการจัดเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ

อัลกอริทึมในการจัดเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ เป็นอัลกอริทึมที่ติดตั้งมาพร้อมกับเซนเซอร์ Solid-state LiDAR ยี่ห้อ/รุ่น Livox Avia โดยนำมาพัฒนาปรับแก้ค่าพื้นฐานให้เหมาะสมกับการใช้งานเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติในอาคาร ซึ่งมีการปรับแก้ค่าต่าง ๆ ดังแสดงดังรูปที่ 3.9

```
<param name="feature_extract_enable" type="bool" value="0"/>
<param name="point_filter_num" type="int" value="5"/>
<param name="max_iteration" type="int" value="10" />
<param name="filter_size_surf" type="double" value="0.3" />
<param name="filter_size_map" type="double" value="0.3" />
<param name="cube_side_length" type="double" value="1000" />
<param name="runtime_pos_log_enable" type="bool" value="0" />
```

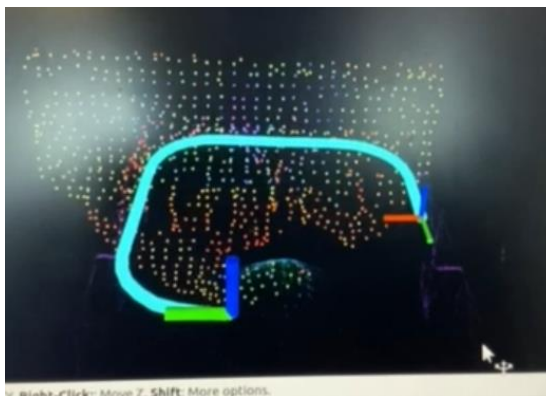
รูปที่ 3.9 การปรับแก้ค่าพื้นฐานของเซนเซอร์ Solid-state LiDAR

- point_filter_num ใช้เพื่อควบคุมจำนวนข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ
- filter_size_surf ใช้เพื่อควบคุมขนาด Voxel ของข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ
- filter_size_map ใช้เพื่อควบคุมขนาด Voxel โดยตั้งค่าให้เท่ากับค่า filter_size_surf เสมอ

หลังจากกำหนดค่าพื้นฐานเซนเซอร์ LiDAR เสร็จสิ้น จากนั้นทำการรันคำสั่งเพื่อบันทึกข้อมูลที่ได้จากการสแกน rosbag play filename.bag และคำสั่งเริ่มการทำงาน roslaunch lidar_scan mapping_avia.launch ตามลำดับ

2) อัลกอริทึมแสดงผลข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติแบบเรียลไทม์

ในการแสดงผลข้อมูลกลุ่มจุดข้อมูลสามมิติที่ได้จากการสแกนแบบเรียลไทม์เลือกใช้โปรแกรม RVIZ ซึ่งสามารถใช้ในการแสดงค่าข้อมูลตำแหน่งและเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบ ซึ่งข้อมูลที่สแกนได้จะออกมาอยู่ในรูปแบบสามมิติ ดังแสดงดังรูปที่ 3.10 ทำให้สามารถเข้าใจลักษณะการสแกนเก็บข้อมูลได้ง่ายขึ้น โดยรันคำสั่งเปิดโปรแกรม roslaunch rviz rviz



รูปที่ 3.10 การแสดงผลข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติในโปรแกรม RVIZ

3.3 การสอบเทียบความแม่นยำระบบ

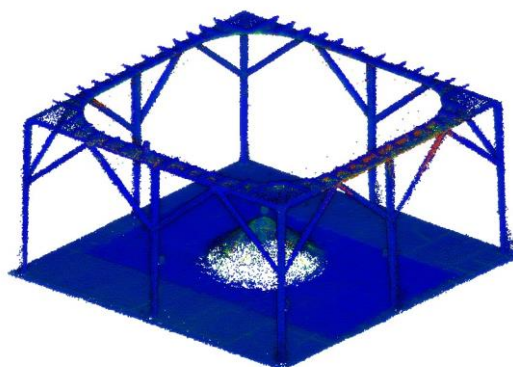
ความน่าเชื่อถือของระบบประเมินปริมาตรที่พัฒนาขึ้น มีความสำคัญอย่างยิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า การสอบเทียบความถูกต้องของระบบ จึงเป็นสิ่งสำคัญหลังจากทำการพัฒนาระบบเสร็จสิ้น โดยการสอบเทียบเครื่องมือ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

3.3.1 การอ้างอิงตำแหน่งพื้นที่ทดลอง (Georeferenced)

ทำการติดตั้งโครงสร้างรางแขวนไว้ในห้องปฏิบัติการที่มีพื้นราบเรียบ โดยโครงสร้างรางแขวน จะมีเสาโครงสร้างจำนวน 8 ต้น ที่มีระยะห่างเท่ากัน ซึ่งแต่ละต้นห่างกันเท่ากับ 3 เมตร และมีการอ้างอิงจุดควบคุมภาคพื้น (Ground control point) ซึ่งเป็นอุปกรณ์รูปทรงกล่อง ดังแสดงดังรูปที่ 3.11 โดยวางไว้ตามจุดต่าง ๆ รอบพื้นที่สแกนเก็บข้อมูลและวัดระยะห่างระหว่างในแต่ละจุด เพื่อช่วยในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและเพิ่มความแม่นยำในการประเมินปริมาตร ดังแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 จุดควบคุมภาคพื้น (Ground control point) รูปทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.12 ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติโครงสร้างรางแขวนที่มีการอ้างอิงตำแหน่งตามแนวแกน (X, Y, Z)

3.3.2 กล่องสอบเทียบ (Calibration box)

หลังจากการอ้างอิงตำแหน่งพื้นที่ทดลองให้อยู่ในระนาบที่ถูกต้องแล้ว กระบวนการถัดไป จะทำการตรวจสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรด้วยกล่องสอบเทียบที่ทราบค่าปริมาตร ซึ่งจะทำให้การทดสอบสแกนเก็บข้อมูลจริง ด้วยกล่องสอบเทียบที่มีขนาดเท่ากับ 46 x 55 x 40 เซนติเมตร ดังแสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับ 0.101 ลูกบาศก์เมตร โดยได้ค่าการสอบเทียบความแม่นยำในการประเมินปริมาตรของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.13 กล่องสอบเทียบปริมาตรขนาด 0.101 ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 3.6 ค่าปริมาตรกล่องสอบเทียบที่ประเมินได้จากระบบ

เก็บข้อมูลครั้งที่	ค่าปริมาตรที่ประเมินได้ (ลบ.ม.)
1	0.109
2	0.102
3	0.107
เฉลี่ย	0.106

ผลจากการสอบเทียบการประเมินปริมาตรด้วยกล่องที่ทราบค่า ดังแสดงในตารางที่ 3.2.1 แสดงให้เห็นถึงค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ที่ 95.05% ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแม่นยำที่กำหนดไว้ โดยกำหนดให้มีค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรมากกว่า 95% ดังนั้นระบบที่พัฒนาขึ้น สามารถนำไปสแกนเก็บข้อมูลการทดลองได้ตามวัตถุประสงค์

3.4 การออกแบบการทดลอง

การจัดเก็บวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า ส่วนใหญ่จะมีการเทกองสินค้าไว้ในคลังสินค้าที่มีพื้นที่กว้าง มีผนังปิดกันชัดเจน โดยสินค้าจะถูกขนส่งมายังคลังสินค้าด้วยรถบรรทุกหรือสายพานลำเลียง ซึ่งส่งผลให้ลักษณะการเทกองของวัสดุมีความแตกต่างกันได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการเทซ้อนทับกันเป็นทรงกรวย การเทกองแบบกระจัดกระจายไร้รูปทรง หรือแม้แต่การเทกองจนเต็มแนบชิดกับผนังคลังสินค้า เป็นต้น ดังนั้น การออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้ จะมุ่งเน้นการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังสินค้าบางกรณีเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การออกแบบการทดลองได้มีการศึกษารูปแบบการทดลองในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบการทดลอง และกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุของระบบ

ตัวแปร	รายการ	หน่วย
ตัวแปรอิสระ	1. ปริมาตรของกองวัสดุ	1, 5 และ 10 ลูกบาศก์เมตร
	2. ความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบ	2, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 เซนติเมตรต่อวินาที
	3. มุมสแกนของระบบ	0, 45 และ 90 องศา
ตัวแปรตาม	1. ค่าความแม่นยำการประเมินปริมาตรวัสดุของระบบ	PoV
ตัวแปรควบคุม	1. สภาพแวดล้อมในพื้นที่ทดลอง	ทำการทดลองในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2567 ซึ่งมีค่าอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการเฉลี่ยประมาณ 35 ถึง 40 องศาเซลเซียส ทดลองในช่วงเวลา 13.00 ถึง 16.00 น.
	2. ขนาดโครงสร้างราง	โครงสร้างรางขนาด 6x6 เมตร โดยติดตั้งระบบที่ความสูง 3 เมตรจากพื้น
	3. ลักษณะการเทกองวัสดุ	กองทรงกรวย ความชันเดียว

3.4.1 ลักษณะกองวัสดุ

วัสดุตัวอย่างที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ คือ แกลบแห้ง เทกองในพื้นที่การทดลองขนาด 36 ตารางเมตร เทกองวัสดุในลักษณะรูปทรงกรวยที่มีความชันเดียว ดังแสดงดังรูปที่ 3.14 ซึ่งเป็นรูปทรงมาตรฐานสำหรับการจัดเก็บวัสดุเทกองในคลังสินค้า การที่เลือกใช้แกลบแห้งเป็นวัสดุตัวอย่าง เนื่องจากแกลบแห้งมีขนาดที่เท่ากันและไม่จับตัวกันเป็นก้อนได้ง่าย ทำให้การสแกนเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติสามารถแสดงลักษณะพื้นผิวของกองวัสดุได้อย่างเสมือนจริง



รูปที่ 3.14 กองแกลบแห้ง รูปทรงกรวยความชันเดียว

3.4.2 ปริมาตรกองวัสดุ

กำหนดปริมาตรของกองวัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ มีจำนวน 3 ปริมาตร ได้แก่ กองวัสดุปริมาตรขนาด 1, 5 และ 10 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยจะทำการสแกนเก็บข้อมูลเริ่มตั้งแต่กองวัสดุปริมาตรขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ไปจนถึง 10 ลูกบาศก์เมตร โดยการเติมแกลบแห้งไปเรื่อย ๆ ซึ่งได้มีการตวงปริมาตรก่อนเทแกลบแห้งลงในกองทดสอบก่อนทุกครั้ง เพื่อตรวจสอบปริมาตร ไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนหรือคลาดเคลื่อนให้น้อยที่สุด

3.4.3 ความเร็วในการเคลื่อนที่

ในการออกแบบระบบ ส่วนของชุดขับเคลื่อนบนรางแขวงให้สามารถเคลื่อนที่ในความเร็วระหว่าง 2-30 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่สแกนเก็บข้อมูล ทำได้ในช่วงความเร็วนี้เท่านั้น โดยกำหนดช่วงความเร็วในการทดลองเก็บข้อมูล ตั้งแต่ความเร็วที่ 2, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งครอบคลุมทุกช่วงความเร็วที่ระบบสามารถทำได้

3.4.4 มุมสแกนเก็บข้อมูล

จากการตั้งสมมติฐาน หากคลังเก็บสินค้ามีขนาดใหญ่เกินกว่ามุมมองการสแกนเก็บข้อมูลของเซนเซอร์ LiDAR จะทำให้ข้อมูลไม่ครอบคลุมกองวัสดุทั้งหมด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการประเมินปริมาณโดยตรง ดังนั้นในการออกแบบการทดลองนี้ จึงมีการทดลองเก็บข้อมูลในมุมที่หลากหลายมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างองศาการสแกนเซนเซอร์กับค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาณ โดยองศาการสแกนเริ่มตั้งแต่มุม 0 องศา คือ มุมที่เซนเซอร์ LiDAR ขนานกับพื้นของคลังสินค้า มุม 45 องศา คือ มุมที่ทำมุมก้มลงกับพื้นของคลัง 45 องศา และ มุม 90 องศา ที่ทำมุม 90 องศา กับพื้นคลังสินค้า ซึ่งแต่ละมุมจะได้ผลลัพธ์ของข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) มุมสแกนที่ 0 องศา

เป็นมุมที่มีองศาการสแกนเก็บข้อมูลที่กว้างที่สุด เพราะสามารถเก็บรายละเอียดของสภาพแวดล้อมโดยรอบได้อย่างครอบคลุม โดยทำมุมขนานกับพื้นห้องปฏิบัติการ ดังแสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งส่งผลต่ออัลกอริทึม SLAM แต่อย่างไรก็ตาม มุมสแกนที่ 0 องศา อาจเก็บข้อมูลบริเวณฐานกองวัสดุด้านใกล้กับเซนเซอร์ไม่ได้ เนื่องจากเซนเซอร์ LiDAR สาดไปไม่ถึง



รูปที่ 3.15 มุมสแกนเก็บข้อมูลที่ 0 องศา

2) มุมสแกนที่ 45 องศา

เป็นมุมที่สามารถสแกนเก็บข้อมูลกองวัสดุได้ครอบคลุมมากที่สุด เพราะเซนเซอร์ LiDAR สามารถสาดลำแสงไปยังกองวัสดุที่อยู่ตรงกลางพื้นที่ทดลองได้อย่างเพียงพอ ซึ่งทำมุมก้ม 45 องศา กับพื้นห้องปฏิบัติการ ดังแสดงดังรูปที่ 3.16 ซึ่งส่งผลทำให้ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ได้มีความหนาแน่นสูง และแสดงลักษณะพื้นผิวของวัสดุได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม หากกองวัสดุมี

ลักษณะที่เหมือนกันทุกด้าน อาจจะทำให้เกิดปัญหากับอัลกอริทึม SLAM ที่ไม่สามารถอ้างอิงตำแหน่งสภาพแวดล้อมได้ตลอดเวลา ซึ่งนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนในการสแกนเก็บข้อมูลได้



รูปที่ 3.16 มุมสแกนเก็บข้อมูลที่ 45 องศา

3) มุมสแกนที่ 90 องศา

เป็นมุมที่สามารถเก็บรายละเอียดข้อมูลบริเวณฐานของวัสดุได้ครบถ้วนมากที่สุด แต่ข้อมูลบริเวณยอดของวัสดุอาจขาดหายไป เพราะเซนเซอร์ LiDAR มีมุมมองการสแกนไม่เพียงพอ และการทำมุม 90 องศากับพื้นห้องปฏิบัติการ ดังแสดงดังรูปที่ 3.17 มีโอกาสเกิดปัญหากับอัลกอริทึม SLAM มากที่สุด เนื่องจากเซนเซอร์ LiDAR ส่องลงพื้นคลังเก็บสินค้า ที่สภาพแวดล้อมไม่มีความแตกต่างกันมากนัก อาจจะทำให้การอ้างอิงตำแหน่งในอัลกอริทึม SLAM ของเซนเซอร์ LiDAR ผิดเพี้ยนได้ง่ายกว่ามุม 45 องศา



รูปที่ 3.17 มุมสแกนเก็บข้อมูลที่ 90 องศา

3.5 วิธีการประเมินปริมาตร

หลังจากทำการสแกนเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติด้วยระบบประเมินปริมาตรของวัสดุที่พัฒนาขึ้นแล้ว กระบวนการต่อไปจะเป็นการนำข้อมูลที่ได้ออกมาทำการประเมินปริมาตรด้วยโปรแกรม CloudCompare ซึ่งเป็นโปรแกรม Open Source ที่มีเครื่องมือในการจัดการข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติและคำนวณปริมาตรได้ โดยขั้นตอนการจัดการข้อมูลและการประเมินปริมาตรจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ มีรายละเอียดวิธีการดังนี้

3.5.1 ขั้นตอนการจัดการข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ

ข้อมูลจุดกลุ่มสามมิติที่ได้จากการสแกนเก็บข้อมูลด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น จะยังไม่สามารถนำมาประเมินปริมาตรได้โดยตรง เพราะต้องมีการกำจัดสิ่งรบกวนและข้อมูลส่วนที่ไม่ต้องการออกก่อน รวมไปถึงการตรวจสอบบรรณานุกรมให้อยู่ในแนวแกนที่กำหนดไว้ ซึ่งกระบวนการจัดการข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ แบ่งออกได้ 5 ขั้นตอนดังนี้

1) นำเข้าข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ

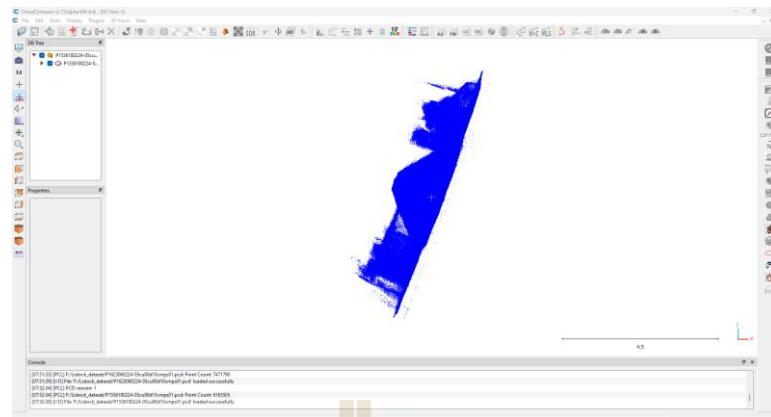
โดยรูปแบบไฟล์ที่ใช้ในการจัดการข้อมูล จะอยู่ในรูปแบบไฟล์ .pcd ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปของข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ ซึ่งการนำเข้าข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ได้จากการสแกน เริ่มจากไปที่แท็บ File กด Open แล้วเลือกใช้ที่ต้องการใน Folder หน้าที่ต่างในโปรแกรม CloudCompare จะทำการโหลดข้อมูลเข้ามาแสดงในหน้าจอ ดังแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การนำเข้าไฟล์ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติในโปรแกรม CloudCompare

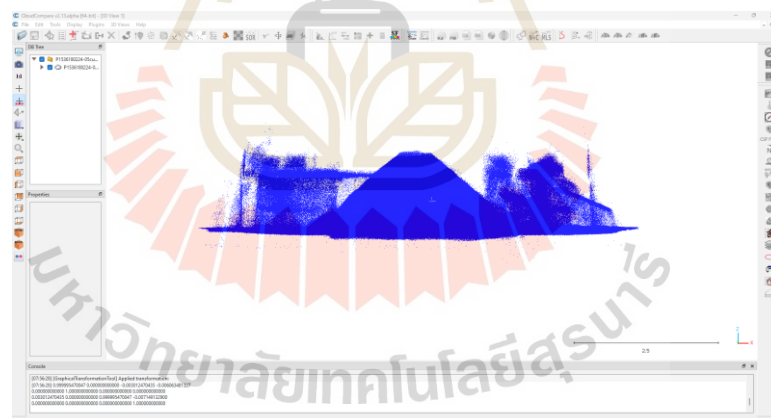
2) จัดระนาบฐานกอง

เมื่อนำเข้าข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติเรียบร้อยแล้ว จะเห็นว่าข้อมูลที่แสดงดังรูปที่ 3.19 ยังไม่อยู่ในแนวแกนที่กำหนด ซึ่งการประเมินปริมาตรวัสดุของควรจัดระนาบฐานกองให้ขนานกับแนวแกน X โดยสังเกตแนวแกนต่าง ๆ ได้จากมุมมองข้างล่าง



รูปที่ 3.19 ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ยังไม่จัดระนาบ

โดยเครื่องมือที่ใช้ในการจัดระนาบฐานของวัสดุ คือ Translate/Rotate เริ่มต้นด้วยการกดที่เครื่องมือ Translate/Rotate เลือกแกนที่ต้องการหมุน แล้วทำการหมุนฐานของให้ขนานกับแกน X, Y และ Z ตามลำดับ ซึ่งขั้นตอนการจัดระนาบฐานของจะทำให้ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่สแกนมาได้ อยู่ในแนวระนาบจริงในพื้นที่ทดลองมากขึ้น ดังแสดงดังรูปที่ 3.20

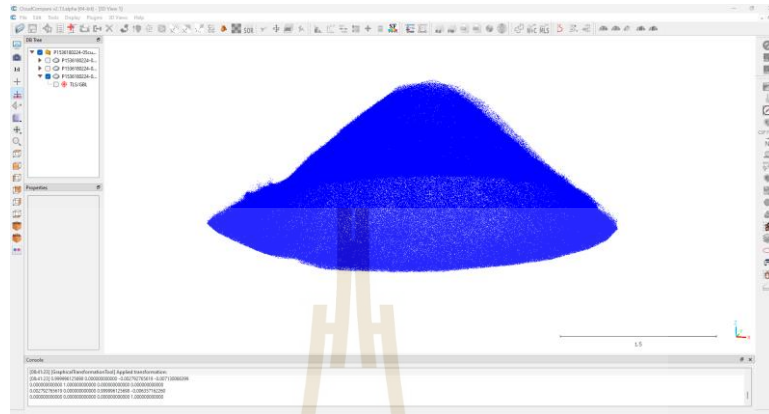


รูปที่ 3.20 ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่จัดระนาบตามแนวแกนแล้ว

3) ตัดข้อมูลส่วนที่ไม่ต้องการ

ทำการตัดข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ เฉพาะส่วนของวัสดุที่ต้องการประเมินปริมาตร ดังแสดงดังรูปที่ 3.21 โดยใช้เครื่องมือ Segment โดยเริ่มต้นจากการตัดฐานของให้เป็นเส้นตรงขนานกับแนวแกน X และ Y ด้วยเครื่องมือ Rectangular Selection แล้วจึงตัดส่วนที่ไม่ต้องการรอบฐานออก ด้วยเครื่องมือ Polygonal Selection ด้วยมุมมองในแนวแกน Z ซึ่งวิธีการที่ทำให้การตัดทอง

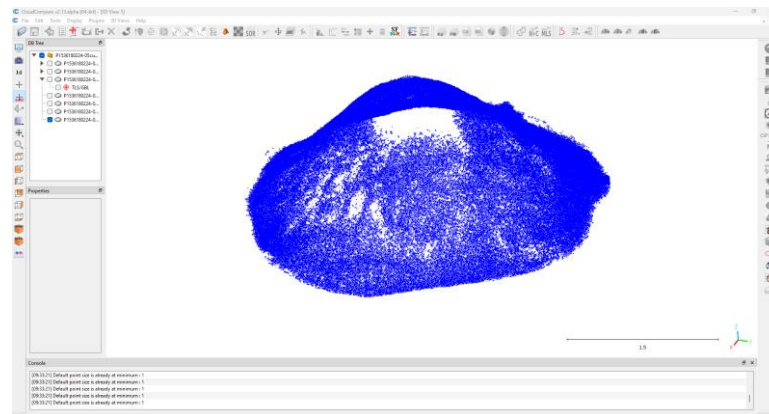
วัสดุที่มีความถูกต้องมากขึ้น คือ การใช้จุดอ้างอิงภาคพื้นในการการหาตำแหน่งขอบเขตเส้นรอบวงของฐานกอง และการใช้ฟังก์ชัน Height Ramp Color โดยฟังก์ชันนี้จะแสดงระดับความสูงกองวัสดุเป็นแถบสีที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้การตัดแยกส่วนฐานกองวัสดุกับพื้นที่ที่ตกลงง่ายขึ้น



รูปที่ 3.21 ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ตัดเอาเฉพาะส่วนกองวัสดุ

4) กำจัดสิ่งรบกวนออก

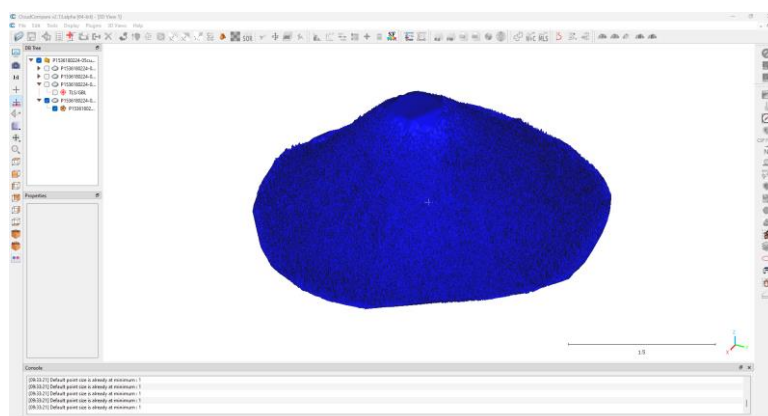
การกำจัดสิ่งรบกวน (Noise) เป็นวิธีการลบข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ฟุ้งกระจายรอบพื้นผิวของกองวัสดุ ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนของอัลกอริทึม SLAM ในการสแกนเก็บข้อมูล หรืออาจเกิดจากสภาพแวดล้อมในพื้นที่ที่ตกลงมีฝุ่นจำนวนมาก ซึ่งวิธีการกำจัดสิ่งรบกวนเหล่านี้สามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ 1) ใช้เครื่องมือ Segment ในการตัดแยงส่วนข้อมูลออก และ 2) ใช้เครื่องมือ Statistical Outlier Removal ในการกำจัดสิ่งรบกวนแบบอัตโนมัติ ดังแสดงดังรูปที่ 3.22 โดยเครื่องมือ Statistical Outlier Removal เป็นการคำนวณหาระยะห่างเฉลี่ยระหว่างจุดแต่ละจุดที่อยู่ใกล้กัน เพื่อหาจุดข้อมูลที่อยู่ไกลเกินกว่าค่าระยะห่างเฉลี่ยที่ได้ แล้วทำการลบจุดข้อมูลนั้นออก โดยสามารถตั้งค่าจำนวนกลุ่มจุดข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณระยะห่างเฉลี่ยได้ ซึ่งค่าเริ่มต้นของโปรแกรมจะเท่ากับ 6 และ $n\sigma$ เท่ากับ 1 ข้อควรระวัง คือ หากกำหนดค่าจำนวนกลุ่มจุดข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณระยะห่างเฉลี่ยมากเกินไป อาจจะทำให้ข้อมูลบางส่วนขาดหาย ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การนำไปสร้างแบบจำลองสามมิติ และทำให้พื้นผิวของวัสดุไม่เหมือนกับลักษณะกองวัสดุจริงได้



รูปที่ 3.22 ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ขาดหายจากการจำกัด Noise มากเกินไป

5) สร้างแบบจำลองสามมิติ

การสร้างแบบจำลองสามมิติจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ เป็นการเติมข้อมูลส่วนที่ขาดหายไปบนพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งวิธีการสร้างแบบจำลองสามมิติ จะใช้กระบวนการ TIN คือ การวาดเส้นตรงเชื่อมจุด 3 จุดที่อยู่ใกล้กันขึ้นเป็นสามเหลี่ยมไร้รูปทรง หรือที่เรียกทั่วไปว่าการสร้าง Mesh โดยการสร้างแบบจำลองสามมิติไปที่ฟังก์ชัน Mesh เลือก Delaunay 2.5D (XY Plan) ระบบจะสร้าง Mesh ขึ้นมาให้แบบอัตโนมัติ แต่ผลลัพธ์ที่ได้ยังมีความไม่เหมือนจริงอยู่ เนื่องจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติไม่ได้เกาะกลุ่มกันที่พื้นผิวของวัสดุเสมอไป ซึ่งทำให้เกิดการสร้าง Mesh ที่เชื่อมต่อกับ Noise ที่จำกัดออกไม่หมด เกิดเป็นสามเหลี่ยมแหลมชี้ขึ้นคล้ายเปลือกทุเรียน ดังแสดงดังรูปที่ 3.23 วิธีการแก้ไขทำได้ 2 วิธี คือ การจำกัดสิ่งรบกวนออกอีกครั้งก่อนการสร้าง Mesh ซึ่งวิธีการนี้อาจต้องใช้เวลาในการจัดการข้อมูลมากยิ่งขึ้น และอีกหนึ่งวิธี คือ การปรับแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้มีความเรียบเนียนด้วยการใช้ฟังก์ชัน Smooth (Laplacian) จะทำให้แบบจำลองสามมิติมีลักษณะคล้ายกองวัสดุจริงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้ฟังก์ชัน Smooth (Laplacian) จะเป็นการลดทอนข้อมูลลงซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุได้



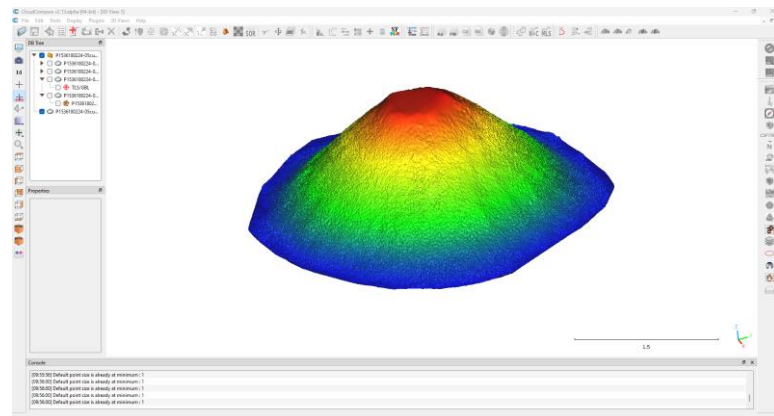
รูปที่ 3.23 การสร้างแบบจำลองสามมิติจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ

3.5.2 ขั้นตอนการประเมินปริมาตร

การประเมินปริมาตรจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ สามารถคำนวณได้หลากหลายวิธี ไม่ที่จะเป็นการใช้กระบวนการ TIN, Grid หรือแบบผสมผสาน ก็สามารถประเมินปริมาตรออกมาได้ ซึ่งกระบวนการแต่ละรูปแบบ จะให้ค่าความแม่นยำที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ อัลกอริทึมในการจัดการ และกระบวนการที่ใช้ในการประเมินปริมาตร โดยการวิจัยนี้ใช้โปรแกรม CloudCompare ในการจัดการข้อมูลและประเมินปริมาตร ซึ่ง CloudCompare ใช้กระบวนการ Grid ในการประเมินปริมาตร และได้ค่าความแม่นยำไม่ต่างกับกระบวนการ TIN สำหรับขั้นตอนการประเมินปริมาตรจากข้อมูลแบบจำลองสามมิติของกองวัสดุ มีรายละเอียดดังนี้

1) แปลงแบบจำลองสามมิติเป็นข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่สม่ำเสมอ

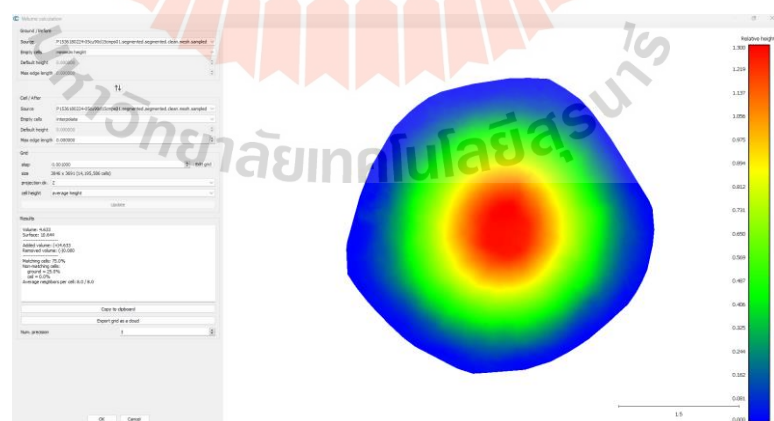
การแปลงแบบจำลองสามมิติให้เป็นข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ เนื่องจากกระบวนการในการประเมินปริมาตรใช้กระบวนการ Grid ซึ่งเป็นการเฉลี่ยจำนวนกลุ่มจุดสามมิติ ลงในตารางกริดที่มีขนาดเท่ากันและประมาณความสูงของเซลล์กริดแต่ละเซลล์เพื่อใช้คำนวณปริมาตร หากไม่มีการสร้าง Mesh ก่อนนำไปประเมินปริมาตร ดังแสดงดังรูปที่ 3.24 ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติในบางเซลล์กริดจะไม่มีข้อมูลอยู่และอัลกอริทึมจะไม่สามารถประมาณความสูงของเซลล์กริดนั้น ส่งผลต่อค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรตามมา โดยฟังก์ชันที่ใช้ในการแปลงแบบจำลองสามมิติเป็นข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ คือ ฟังก์ชัน Sample Points ซึ่งระบบจะสามารถกำหนดจำนวนข้อมูลกลุ่มสามมิติที่ต้องการได้ ยิ่งกำหนดจำนวนข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติมากเท่าไร ยิ่งทำให้ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติแสดงลักษณะพื้นผิวของวัสดุได้ดี แต่อย่างไรก็ตามควรคำนึงถึงประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์และระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลนี้อาจใช้เวลานานขึ้น



รูปที่ 3.24 การแปลงแบบจำลองสามมิติเป็นข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ

2) คำนวณปริมาตรจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติด้วยกระบวนการ 2.5D

หลังจากทำการแปลงข้อมูลแบบจำลองสามมิติ เป็นข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่สม่ำเสมอแล้ว กระบวนการต่อไปเป็นการคำนวณปริมาตร โดยใช้ฟังก์ชัน Compute 2.5D Volume ซึ่งเป็นกระบวนการ Grid ที่แบ่งจำนวนข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติออกเป็นตารางเซลล์กริด โดยสามารถกำหนดขนาดของเซลล์กริดได้ที่ Grid Step จากนั้นระบบจะทำการประมาณความสูงของแต่ละเซลล์ โดยการหาค่าเฉลี่ยความสูงจากข้อมูลที่มีอยู่ในตารางเซลล์กริด สร้างเป็นปริซึมสี่เหลี่ยมความสูงตามค่าที่ประเมินได้ในแต่ละเซลล์ หลังจากนั้นทำการคำนวณหาผลรวมปริมาตรของปริซึมสี่เหลี่ยมทุกเซลล์ ก็จะได้เป็นค่าการประเมินปริมาตรรวมของกบฏวัสดุทั้งหมด ดังแสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การประเมินปริมาตรจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ

การเก็บข้อมูลผลการทดลอง จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง โดยกำหนดปริมาตรเท่ากับ 1, 5 และ 10 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ทำการสแกนเก็บข้อมูลด้วยระบบประเมินปริมาตรวัสดุที่พัฒนาขึ้น โดยจะสแกนเก็บข้อมูลทำซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง เพื่อนำไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยของการประเมินปริมาตร โดยคำนวณจากสมการ 3.1 แล้วทำการบันทึกค่าลงในตารางที่ 3.8

$$\bar{x} = \frac{(1st\ estimated\ volume + 2nd\ estimated\ volume + 3rd\ estimated\ volume)}{3} \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรของระบบที่พัฒนา

มุม เซนเซอร์ (องศา)	ความเร็ว เคลื่อนที่ (m/s)	ปริมาตรที่ประเมินได้ (ลบ.ม.)				จำนวนข้อมูลกลุ่ม จุดสามมิติเฉลี่ยที่ ใช้ในการประเมิน ปริมาตร	ค่าความ แม่นยำ (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย (\bar{x})		
0	0.02						
	0.05						
	0.10						
	0.15						
	0.20						
	0.25						
	0.30						
45	0.02						
	0.05						
	0.10						
	0.15						
	0.20						
	0.25						
	0.30						
90	0.02						
	0.05						
	0.10						
	0.15						
	0.20						
	0.25						
	0.30						

3.6 การสอบเทียบความแม่นยำ

การสอบเทียบความแม่นยำของการประเมินปริมาตรที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้น เป็นส่วนสำคัญในการตรวจสอบคุณภาพของระบบขั้นสุดท้าย ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินความสามารถของระบบที่พัฒนาขึ้นเทียบกับเครื่องมือที่อยู่ในปัจจุบัน โดยเครื่องมือที่ใช้ในการสอบเทียบการเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า จะใช้เครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น ยี่ห้อ/รุ่น FARO Focus ดังแสดงดังรูปที่ 3.26 ซึ่งเป็นเครื่องมือสแกนเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติประสิทธิภาพสูง มีการนำไปใช้สอบเทียบความแม่นยำของระบบที่พัฒนาขึ้นในหลากหลายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง เช่น งานวิจัยของ Manish et al. (2022) เป็นต้น โดยการคำนวณสอบเทียบค่าความแม่นยำการประเมินปริมาตร มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.26 การสแกนเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติด้วย Faro Focus

3.6.1 การสอบเทียบค่าความแม่นยำการประเมินปริมาตร

ค่าความแม่นยำของการประเมินปริมาตร (Precision of Volume : PoV) คำนวณได้โดยการหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของปริมาตรที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นกับปริมาตรจากเครื่องมือสอบเทียบ (Yang et al., 2020) โดยใช้สมการ 3.2 แล้วทำการบันทึกค่าลงในตารางที่ 3.5

$$PoV = \left(1 - \frac{|v - \bar{v}|}{\bar{v}}\right) \times 100\% \quad (3.2)$$

โดยที่ ν และ $\bar{\nu}$ คือ ปริมาตรที่ประเมินได้จากเครื่องมือสอบเทียบและปริมาตรที่คำนวณได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นตามลำดับ ซึ่งความแม่นยำของปริมาตร (PoV) มากเท่าไร ระบบที่พัฒนาขึ้นก็จะประเมินปริมาตรได้แม่นยำมากขึ้นเท่านั้น



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

บทนี้นำเสนอผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล การพัฒนาระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ โดยการทำการทดสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรในพื้นที่ปฏิบัติการ ขนาด 108 ลูกบาศก์เมตร ด้วยวัสดุแกลบแห้งทรงกรวย กำหนดปริมาตรของกองวัสดุทดสอบเท่ากับ 1, 5 และ 10 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ด้วยมุมมองการสแกนเก็บข้อมูล 0, 45 และ 90 องศา โดยทดสอบในช่วงความเร็วเคลื่อนที่ของระบบเท่ากับ 2, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 เซนติเมตรต่อวินาที และใช้โปรแกรม CloudCompare ในการจัดการข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติและประเมินปริมาตรวัสดุเทกอง ได้ผลลัพธ์การทดสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุตัวอย่างด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการทดสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองของระบบ

ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

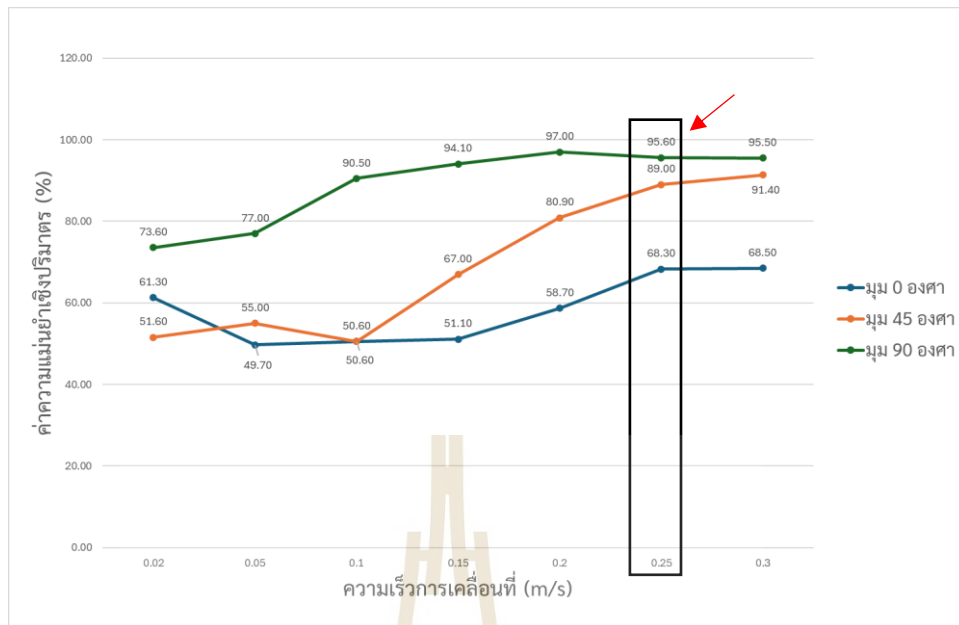
การทดลองที่ 1: วัสดุแกลบตัวอย่าง ที่ปริมาตรเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เมตร จัดวางไว้ที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง ดังแสดงดังรูปที่ 4.1 ทำการสอบเทียบข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น ยี่ห้อ/รุ่น FARO Focus ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แกลบแห้งปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุ 1 ลูกบาศก์เมตร

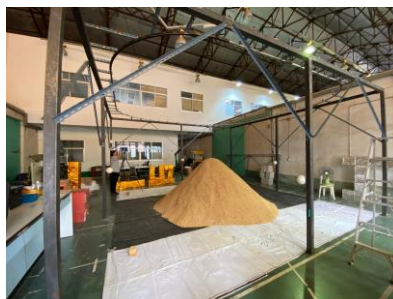
มุม เซนเซอร์ (องศา)	ความเร็ว เคลื่อนที่ (m/s)	ปริมาตรที่ประเมินได้ (ลบ.ม.)				จำนวนข้อมูลกลุ่ม จุดสามมิติเฉลี่ยที่ใช้ ในการประเมิน ปริมาตร	ค่าความ แม่นยำ (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย (\bar{x})		
0	0.02	1.39	1.35	1.42	1.387	29,751.333	61.30
	0.05	1.45	1.52	1.53	1.503	27,503.000	49.70
	0.10	1.50	1.47	1.51	1.494	22,269.333	50.60
	0.15	1.52	1.48	1.46	1.489	12,298.333	51.10
	0.20	1.42	1.47	1.35	1.413	9,970.000	58.70
	0.25	1.29	1.33	1.33	1.317	4,874.000	68.30
	0.30	1.29	1.33	1.33	1.315	4,229.333	68.50
45	0.02	0.48	0.56	0.51	0.516	1,999,030.667	51.60
	0.05	0.47	0.61	0.57	0.55	1,999,044.000	55.00
	0.10	0.57	0.47	0.48	0.506	1,931,573.000	50.60
	0.15	0.66	0.67	0.67	0.67	1,453,208.333	67.00
	0.20	0.85	0.81	0.77	0.809	1,246,624.667	80.90
	0.25	0.87	0.90	0.90	0.89	924,290.000	89.00
	0.30	0.98	0.87	0.89	0.914	763,184.333	91.40
90	0.02	0.83	0.77	0.60	0.736	1,453,936.333	73.60
	0.05	0.79	0.76	0.76	0.77	1,126,480.667	77.00
	0.10	0.87	0.86	0.98	0.905	738,640.333	90.50
	0.15	0.87	0.96	1.00	0.941	586,081.333	94.10
	0.20	0.95	0.97	0.99	0.97	457,614.000	97.00
	0.25	1.01	1.06	1.06	1.044	333,634.333	95.60
	0.30	1.06	1.07	1.01	1.045	282,292.333	95.50



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตรกับความเร็วในการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตรกับความเร็วในการเคลื่อนที่ โดยมุมสแกนและความเร็วในการเก็บข้อมูลที่ทำให้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรสูงที่สุด คือ ที่มุมสแกน 90 องศา เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที ได้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรเท่ากับ 97% โดยแนวโน้มมุมสแกนที่มีค่าความแม่นยำการประเมินปริมาตรสูงขึ้นด้วย เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น คือ ที่มุมสแกน 45 องศา และที่มุมสแกน 0 และ 90 องศา ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรมีแนวโน้มคงที่เมื่อความเร็วการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

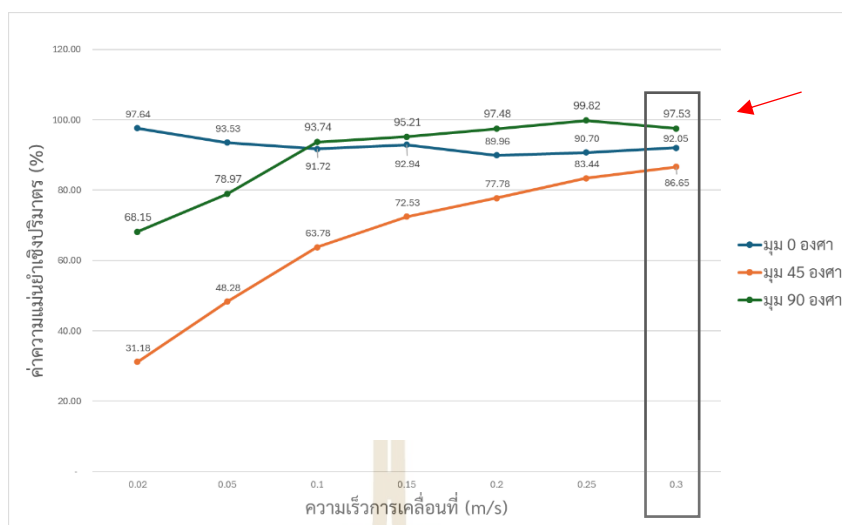
การทดลองที่ 2: วัสดุเกลบตัวอย่าง ที่ปริมาตรเท่ากับ 5 ลูกบาศก์เมตร วางไว้ที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง ดังแสดงดังรูปที่ 4.3 ทำการตรวจเทียบข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น ยี่ห่อ/รุ่น FARO Focus ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 ถังเก็บปริมาณ 5 ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุ 5 ลูกบาศก์เมตร

มุม เซนเซอร์ (องศา)	ความเร็ว เคลื่อนที่ (m/s)	ปริมาตรที่ประเมินได้ (ลบ.ม.)				จำนวนข้อมูลกลุ่ม จุดสามมิติเฉลี่ยที่ ใช้ในการประเมิน ปริมาตร	ค่าความ แม่นยำ (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย (\bar{x})		
0	0.02	4.442	4.496	4.469	4.469	878,757.333	97.64
	0.05	4.864	4.856	4.900	4.873	425,610.333	93.53
	0.10	4.933	4.968	4.967	4.956	293,306.667	91.72
	0.15	4.851	4.875	4.974	4.900	230,179.667	92.94
	0.20	5.038	5.020	5.052	5.037	187,722.667	89.96
	0.25	4.951	5.032	5.025	5.003	168,386.000	90.70
	0.30	4.825	5.004	4.994	4.941	201,317.333	92.05
45	0.02	1.094	1.629	1.558	1.427	9,215,055.000	31.18
	0.05	2.089	2.023	2.517	2.210	5,144,527.333	48.28
	0.10	2.910	2.891	2.957	2.919	3,193,886.000	63.78
	0.15	3.344	3.336	3.279	3.320	2,439,539.000	72.53
	0.20	3.562	3.569	3.549	3.560	2,029,261.000	77.78
	0.25	3.857	3.832	3.768	3.819	1,626,727.000	83.44
	0.30	3.864	3.994	4.040	3.966	1,430,269.000	86.65
90	0.02	3.127	2.873	3.357	3.119	6,626,455.000	68.15
	0.05	3.545	3.783	3.515	3.614	3,792,835.333	78.97
	0.10	4.226	4.382	4.264	4.291	2,346,236.000	93.74
	0.15	4.377	4.228	4.468	4.358	1,955,256.667	95.21
	0.20	4.362	4.450	4.573	4.462	1,771,683.000	97.48
	0.25	4.515	4.647	4.594	4.585	1,295,254.667	99.82
	0.30	4.530	4.460	5.080	4.690	1,188,575.000	97.53



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองปริมาตร 5 ลูกบาศก์เมตรกับความเร็วในการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองปริมาตร 5 ลูกบาศก์เมตรกับความเร็วในการเคลื่อนที่ โดยมูมสแกนและความเร็วในการเก็บข้อมูลที่ให้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรสูงที่สุด คือ ที่มูมสแกน 90 องศา เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.25 เมตรต่อวินาที ได้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรเท่ากับ 99.82% โดยแนวโน้มมูมสแกนที่มีค่าความแม่นยำการประเมินปริมาตรสูงขึ้นด้วย เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น คือ ที่มูมสแกน 45 องศา และที่มูมสแกน 0 และ 90 องศา ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรมีแนวโน้มคงที่ เมื่อความเร็วการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

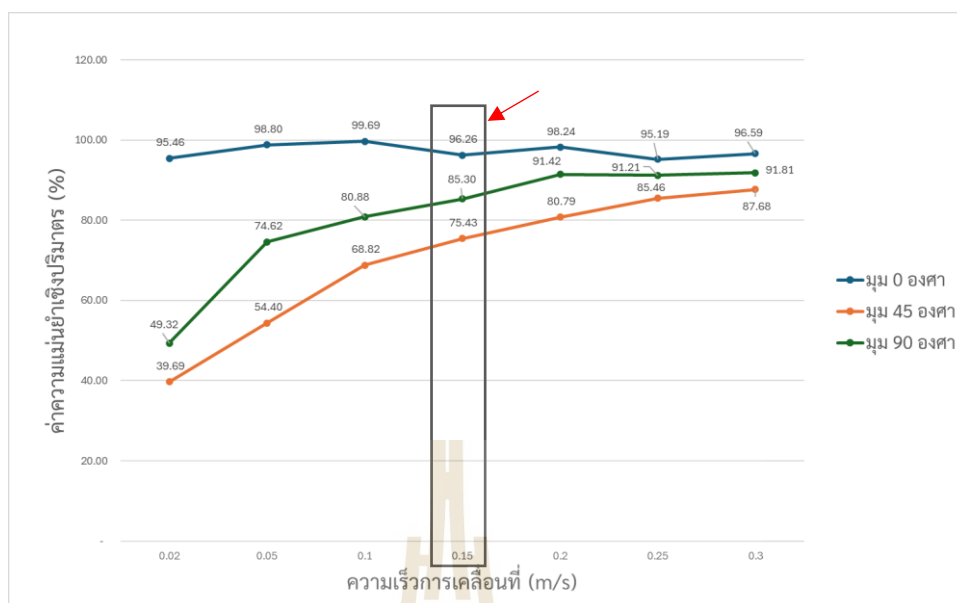
การทดลองที่ 3: วัสดุเกลบตัวอย่าง ที่ปริมาตรเท่ากับ 10 ลูกบาศก์เมตร วางไว้ที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของพื้นที่ทดลอง ดังแสดงดังรูปที่ 4.5 ทำการตรวจเทียบข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์แบบภาคพื้น ยี่ห้อ/รุ่น FARO Focus ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.5 เกลบแห้งปริมาตร 10 ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์การทดสอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุ 10 ลูกบาศก์เมตร

มุม เซนเซอร์ (องศา)	ความเร็ว เคลื่อนที่ (m/s)	ปริมาตรที่ประเมินได้ (ลบ.ม.)				จำนวนข้อมูลกลุ่ม จุดสามมิติเฉลี่ยที่ ใช้ในการประเมิน ปริมาตร	ค่าความ แม่นยำ (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย (\bar{x})		
0	0.02	8.491	8.489	9.139	8.706	1,373,831.000	95.46
	0.05	9.094	8.953	8.985	9.011	767,013.333	98.80
	0.10	9.280	9.142	9.023	9.148	552,472.667	99.69
	0.15	9.368	9.328	9.687	9.461	429,724.667	96.26
	0.20	9.247	9.285	9.310	9.281	340,997.000	98.24
	0.25	9.764	9.536	9.375	9.558	286,959.333	95.19
	0.30	9.480	9.390	9.423	9.431	252,656.667	96.59
45	0.02	3.495	3.683	3.680	3.619	10,142,561.000	39.69
	0.05	4.950	5.064	4.871	4.962	6,782,176.333	54.40
	0.10	6.300	6.268	6.261	6.276	4,362,959.333	68.82
	0.15	6.930	6.858	6.850	6.879	3,397,688.000	75.43
	0.20	7.379	7.334	7.392	7.368	2,697,556.667	80.79
	0.25	7.833	7.740	7.810	7.794	2,163,970.000	85.46
	0.30	7.994	7.974	8.020	7.996	1,961,080.000	87.68
90	0.02	4.673	5.140	3.680	4.498	10,059,900.000	49.32
	0.05	7.812	6.520	6.084	6.805	6,072,430.667	74.62
	0.10	7.620	7.856	6.654	7.377	4,961,212.000	80.88
	0.15	7.708	7.885	7.746	7.780	3,171,416.000	85.30
	0.20	8.377	8.207	8.428	8.337	2,890,598.333	91.42
	0.25	8.252	8.116	8.587	8.318	2,226,883.333	91.21
	0.30	8.484	8.257	8.378	8.373	2,030,353.667	91.81

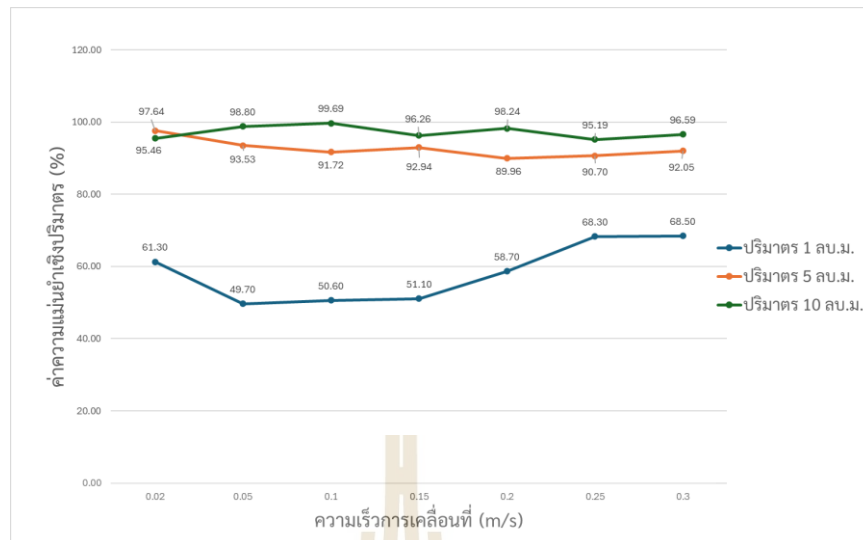


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองปริมาตร 10 ลูกบาศก์เมตรกับความเร็วในการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองปริมาตร 5 ลูกบาศก์เมตรกับความเร็วในการเคลื่อนที่ โดยมุมสแกนและความเร็วในการเก็บข้อมูลที่ให้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรสูงที่สุด คือ ที่มุมสแกน 0 องศา เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที ได้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรเท่ากับ 99.63% โดยแนวโน้มมุมสแกนที่มีค่าความแม่นยำการประเมินปริมาตรสูงขึ้นด้วย เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น คือ ที่มุมสแกน 45 องศา และที่มุมสแกน 0 และ 90 องศา ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรมีแนวโน้มคงที่เมื่อความเร็วการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

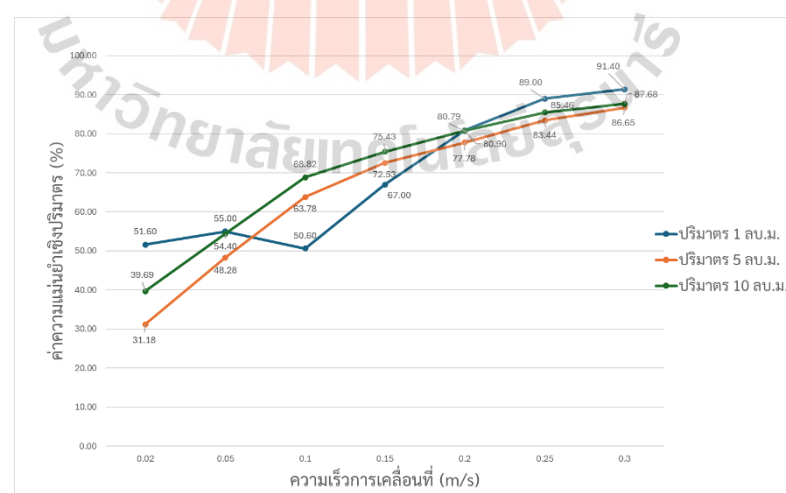
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสแกนเก็บข้อมูลของระบบกับค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรกองวัสดุขนาดต่าง ๆ

การสแกนเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติในมุมสแกนที่แตกต่างกัน ทำให้การประเมินหาปริมาตรได้ค่าความแม่นยำที่แตกต่างกันไป โดยจะแสดงผ่านกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมสแกนเก็บข้อมูลของระบบกับค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร มีรายละเอียดดังนี้



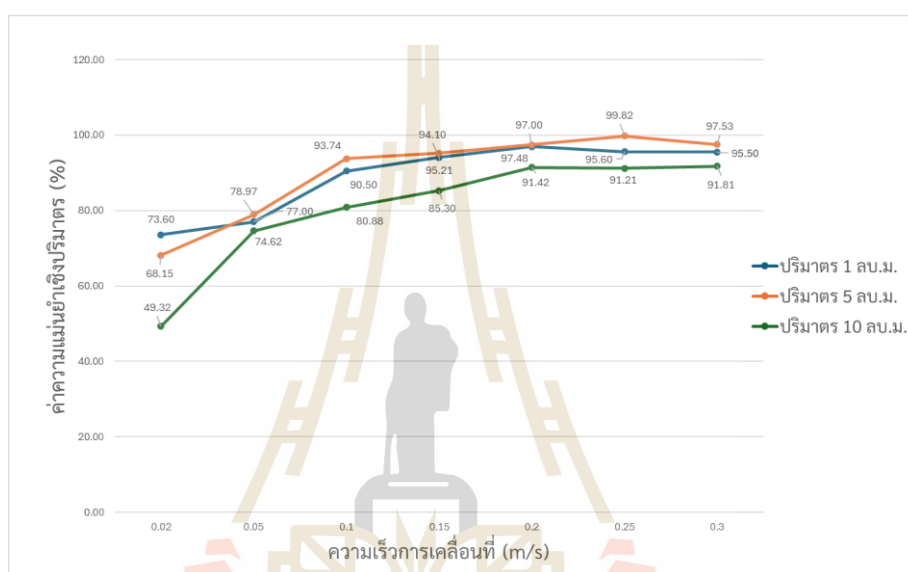
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสแกนเก็บข้อมูลที่ 0 องศา กับค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรของวัสดุขนาดต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองที่มีมุมสแกน 0 องศา โดยขนาดปริมาตรของกองวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการประเมินที่มุมนี้ คือ วัสดุเทกองขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งให้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ในช่วง 95.19% ถึง 99.69% วัสดุเทกองขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร ให้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ในช่วง 89.96% ถึง 97.64% และวัสดุเทกองขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ให้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ในช่วง 49.70% ถึง 68.50% ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสแกนเก็บข้อมูลที่ 45 องศา กับค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรของวัสดุขนาดต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองที่มุมสแกน 45 องศา โดยค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองทั้ง 3 ขนาดมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งวัสดุเทกองขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ในช่วง 51.60% ถึง 91.40% วัสดุเทกองขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร มีค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ในช่วง 39.69% ถึง 87.68% และวัสดุเทกองขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร มีค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ในช่วง 31.18% ถึง 86.65% ตามลำดับ



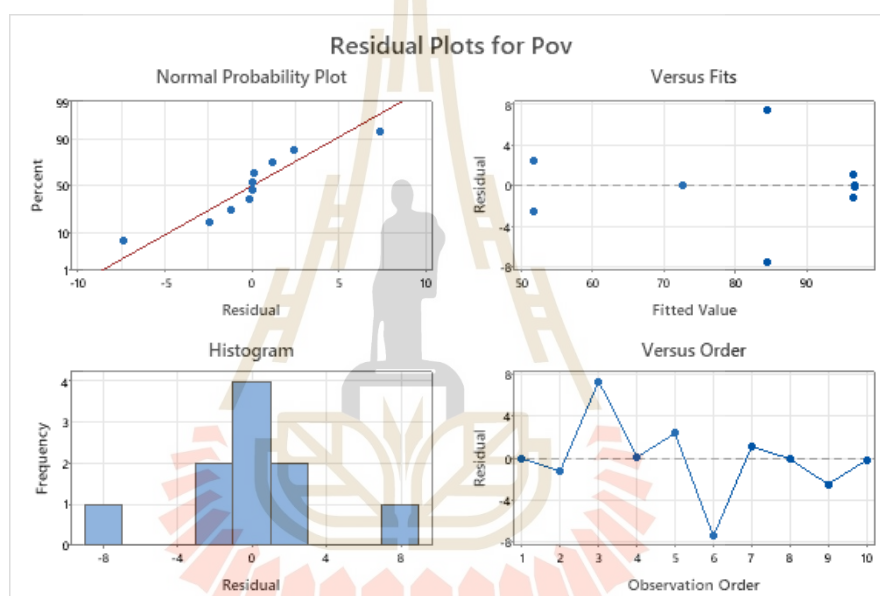
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสแกนกับข้อมูลที่ 90 องศา กับค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรของวัสดุขนาดต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองที่มุมสแกน 90 องศา โดยค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองทั้ง 3 ขนาดมีแนวโน้มคงที่ เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งวัสดุเทกองขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ในช่วง 51.60% ถึง 91.40% วัสดุเทกองขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร มีค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ในช่วง 39.69% ถึง 87.68% และวัสดุเทกองขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร มีค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอยู่ในช่วง 31.18% ถึง 86.65% ตามลำดับ

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองทำการตรวจสอบค่าความเหมาะสมและความถูกต้องของสมการถดถอย โดยวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้าง จากรูปที่ 4.10 ข้อมูลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง

(Residuals) ของค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรที่ได้จากระบบ พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับแผนภูมิฮิสโทแกรมที่มีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นโค้งปกติ และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวระหว่างส่วนตกค้างกับผลตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย (Fitted Value) พบว่ามีลักษณะการเรียงตัวที่ไม่แน่นอนแสดงว่า ข้อมูลเป็นแบบสุ่มและแต่ละกลุ่มมีความแปรปรวนเท่าๆ กัน ส่วนกราฟลำดับการเก็บข้อมูล (Observation Order) มีการกระจายทั้งด้านบนและด้านล่างแสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลการทดลองชุดนี้ มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95



รูปที่ 4.10 กราฟค่าส่วนตกค้างของผลตอบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรจากการทดลอง

4.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร

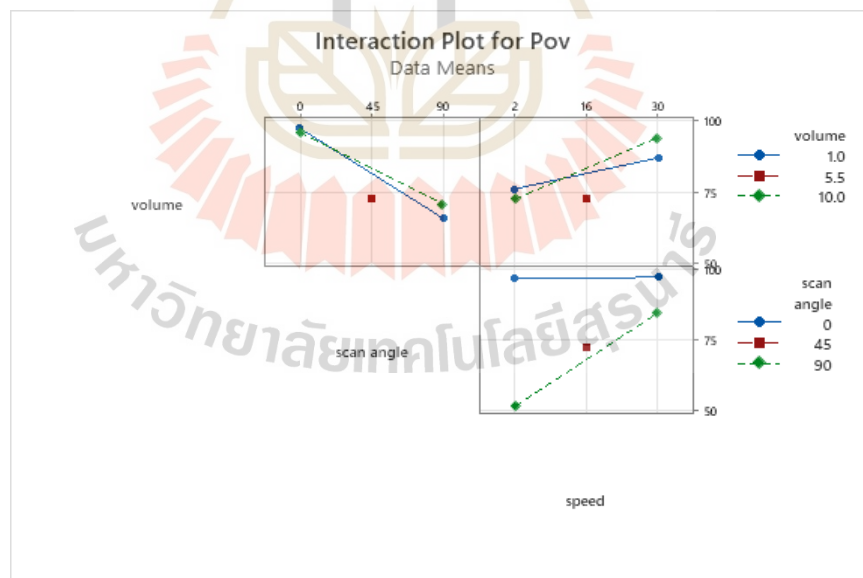
เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแม่นยำของการประเมินปริมาตร จากรูปที่ 4.11 พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ คือ มุมสแกนและความเร็วในการเคลื่อนที่

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	72.53	3.53	20.57	0.000	
scan angle	-13.48	1.66	-8.11	0.000	1.00
speed	7.72	1.66	4.65	0.006	1.00
scan angle*scan angle	8.76	3.50	2.50	0.055	1.00
scan angle*speed	7.23	1.57	4.62	0.006	1.00

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.98611	95.83%	92.50%	83.32%

รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบสนองค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง โดยพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value น้อยกว่า $\alpha = 0.05$) พบว่าอิทธิพลร่วมของปัจจัยมีทั้งหมด 1 คู่ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างมุมสแกนเก็บข้อมูลและความเร็วในการเคลื่อนที่ โดยค่า P-Value เท่ากับ 0.006 สามารถอธิบายอิทธิพลร่วมของแต่ละปัจจัยได้ดังนี้ มุมสแกนเก็บข้อมูลที่ระดับปัจจัย 90 องศา มีค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ระดับปัจจัย 30 เซนติเมตรต่อวินาที

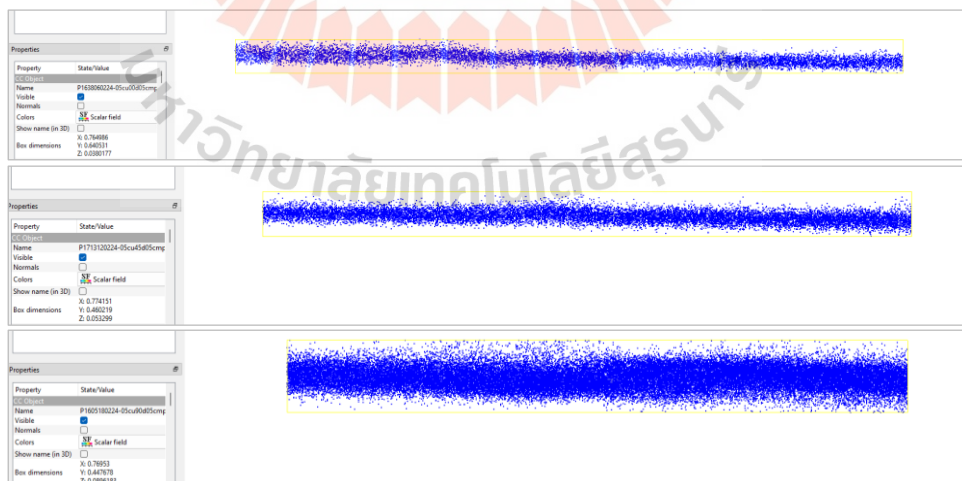


รูปที่ 4.12 ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมของค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร

4.3.2 การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร

1) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบ ส่งผลต่อค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่สแกนเก็บข้อมูลช้าลง จำนวนข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ได้จะมีจำนวนมาก ซึ่งจะมีการซ้อนทับกันของข้อมูลมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรของระบบลดลง อันเนื่องมาจากอัลกอริทึมในการสแกนเก็บข้อมูล ทำการเก็บข้อมูลซ้อนทับกันในพื้นที่เดียวกันมากเกินไป ลักษณะของข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่เกิดขึ้นคล้ายขนมชั้น ยิ่งข้อมูลมีความหนาของชั้นข้อมูลมากเท่าไร จะทำให้ข้อมูลเกิดความคลาดเคลื่อนมากยิ่งขึ้น แต่ถ้าหากความเร็วของระบบเพิ่มขึ้นอยู่ในจุดที่เหมาะสม ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

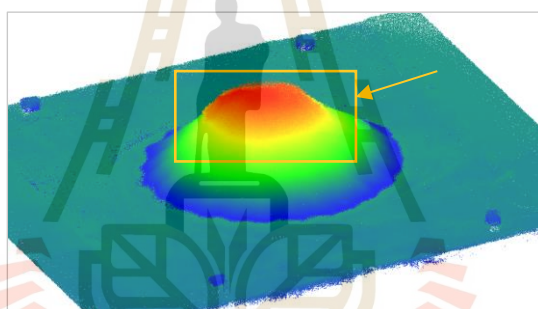
2) มุมสแกนเก็บข้อมูล ส่งผลต่อค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรอย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งมุมสแกนที่สามารถเก็บข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติของสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้อย่างครอบคลุมมีแนวโน้มทำให้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรเพิ่มขึ้น ดังแสดงดังรูปที่ 4.13 ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติของกองวัสดุปริมาตร 5 ลูกบาศก์เมตร ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 5 เซนติเมตรต่อวินาที ณ มุมที่แตกต่างกัน ที่มุม 0 องศา จะเห็นว่าความหนาของข้อมูลกลุ่มสามมิติจะมีความบางกว่าข้อมูลที่ได้จากมุม 90 องศา โดยเกิดจากมุมมองการสแกนที่มุม 90 องศาแคบกว่ามุมมองที่มุม 0 องศา จึงส่งผลทำให้ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ได้มีการซ้อนทับกัน หากเพิ่มมุมมองการสแกนให้กว้างขึ้นก็จะสามารถลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลลงได้ เช่น เพิ่มระยะห่างระหว่างกองวัสดุและระบบให้มากขึ้น ปรับมุมสแกนของระบบให้สามารถสแกนเก็บข้อมูลสิ่งแวดล้อมให้ครอบคลุมมากขึ้น เป็นต้น



รูปที่ 4.13 ความหนาของข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติของกองวัสดุปริมาตร 5 ลูกบาศก์เมตร ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 5 เซนติเมตรต่อวินาที ณ มุมที่แตกต่างกัน

- (ก) ความหนาของข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่มุม 0 องศา เท่ากับ 0.03
- (ข) ความหนาของข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่มุม 45 องศา เท่ากับ 0.05
- (ค) ความหนาของข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่มุม 90 องศา เท่ากับ 0.08

3) กองวัสดุที่มีขนาดเล็กจนเกินไป จะทำให้อัลกอริทึมในการสแกนเก็บข้อมูล มีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังแสดงดังรูป 4.14 ส่งผลทำให้ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao et al. (2012) ที่ได้สรุปผลงานวิจัยไว้ว่าหากกองวัสดุมีขนาดเล็ก ค่าความแม่นยำของการประเมินปริมาตรของระบบนี้จะลดลง และงานวิจัยของ de Lima and Costa (2021) ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรที่ได้ มีความสัมพันธ์กับความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของกองวัสดุ ดังนั้นการใช้ระบบประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยใช้เทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติในการประเมินปริมาตรของกองวัสดุขนาดเล็ก อาจมีความไม่เหมาะสมในการประเมินปริมาตรด้วยวิธีการนี้



รูปที่ 4.14 กองวัสดุปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร มีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก

จากผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้าโดยใช้เทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตร คือ มุมสแกนและความเร็วในการเคลื่อนที่ และทั้ง 2 ปัจจัยยังมีอิทธิพลร่วมกันอีกด้วย โดยมุมสแกนและความเร็วในการเคลื่อนที่ที่จะส่งผลต่อจำนวนข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติได้โดยตรง หากมุมสแกนเก็บข้อมูลแคบเกินไป จะทำให้จำนวนข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติมีความหนาแน่นและเกิดการซ้อนทับกันมากขึ้น เช่นเดียวกับความเร็วในการเคลื่อนที่ หากความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าจำนวนข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติจะมีความแตกต่างกันน้อย ส่งผลทำให้อัลกอริทึมในการเก็บข้อมูลตำแหน่งกลุ่มจุดสามมิติเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย อีกทั้งผลการวิเคราะห์ข้อมูลยังแสดงให้เห็นว่าการประเมินปริมาตรวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยใช้เทคโนโลยี

วัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติในการประเมินปริมาตรของกองวัสดุที่มีขนาดเล็กจนเกินไป จะทำให้ความความแม่นยำในการประเมินปริมาตรของระบบลดลง



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้นำเสนอการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ หลังจากทำการพัฒนาระบบการประเมินปริมาณวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้าโดยใช้เทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ เพื่อเปรียบเทียบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาณของข้อมูลปริมาณวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้าที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นนั้น สามารถสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ค่าความแม่นยำของการประเมินปริมาณวัสดุเทกองขนาด 1 ลูกบาศก์เมตรสูงสุด เท่ากับ 97% ที่มุมสแกน 90 องศา ณ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 20 เซนติเมตรต่อวินาที ความแม่นยำของการประเมินปริมาณวัสดุเทกองขนาด 5 ลูกบาศก์เมตรสูงสุด เท่ากับ 99.82% ที่มุมสแกน 90 องศา ณ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 25 เซนติเมตรต่อวินาที และความแม่นยำของการประเมินปริมาณวัสดุเทกองขนาด 10 ลูกบาศก์เมตรสูงสุด เท่ากับ 99.63% ที่มุมสแกน 0 องศา ณ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 เซนติเมตรต่อวินาที โดยค่าความแม่นยำของการประเมินปริมาณวัสดุเทกองของระบบที่พัฒนาขึ้น มีความสัมพันธ์กับปริมาณของกองวัสดุ มุมสแกน และความเร็วในการเคลื่อนที่เก็บข้อมูล ดังนั้นทำให้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาณวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยใช้เทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao et al. (2012) ที่พัฒนาระบบประเมินปริมาณวัสดุเทกองบนรางเลื่อนโดยใช้ 2D LiDAR ที่มีค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาณอยู่ในช่วง 96.2% ถึง 99.4% และสามารถช่วยลดข้อจำกัดในการประเมินสินค้าเทกองแบบเดิม ที่ต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูล เสี่ยงต่อการเกิดอันตรายกับเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงาน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu et al. (2022) โดยระบบประเมินปริมาณวัสดุเทกองในคลังเก็บสินค้า โดยใช้เทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นนี้ ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน ได้แก่ คอมพิวเตอร์ขนาดเล็กสำหรับประมวลผลข้อมูล เซนเซอร์ LiDAR ประเภท Solid-state แบตเตอรี่สำหรับให้พลังงาน และชุดขับเคลื่อนบนรางแขวน ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีราคาถูกกว่าเครื่องมือเก็บข้อมูลสามมิติที่มีอยู่ในตลาดหลายเท่าตัว ทำให้เหมาะกับผู้ประกอบการโรงสีข้าวขนาดกลางและขนาดย่อมในประเทศไทยที่มีอยู่จำนวนมาก ส่งผลทำให้ผู้ประกอบการโรงสีข้าว สามารถเพิ่มศักยภาพในการบริหารจัดการคลังเก็บสินค้าแบบเทกองได้ดีมากยิ่งขึ้น

หากผู้ประกอบการโรงสีข้าวหรือผู้ที่สนใจต้องการนำระบบประเมินปริมาณวัสดุเทกองด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติไปประยุกต์ใช้ในคลังเก็บสินค้าประเภทอื่น ๆ ควรเข้ารับคำปรึกษาจากคณะผู้ทําวิจัย เพื่อออกแบบพัฒนาระบบประเมินปริมาณวัสดุเทกองให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของคลังเก็บสินค้าที่มีความแตกต่างกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

แม้ว่างานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาระบบประเมินปริมาณวัสดุเทกองด้วยเทคโนโลยีวัดระยะด้วยแสงแบบรางเคลื่อนที่อัตโนมัติ ครอบคลุมการสแกนข้อมูลวัสดุเทกองทรงกรวย ในช่วงความเร็วตั้งแต่ 2 ถึง 30 เซนติเมตรต่อวินาที มุมสแกนเก็บข้อมูล 0, 45, และ 90 องศาเท่านั้น ดังนั้นการมีการวิจัยต่อยอดในอนาคต ควรเพิ่มขอบเขตการวิจัยในกว้างขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจริงของการจัดเก็บสินค้าเทกองในคลังสินค้าที่มีความหลากหลาย โดยข้อมูลด้านล่างนี้เป็นข้อเสนอแนะสำหรับนักวิจัยผู้สนใจในการพัฒนางานวิจัยเรื่องนี้ต่อไป

5.2.1 เพิ่มปริมาตรที่ทราบค่าของวัสดุเทกองให้มีขนาดที่หลากหลายมากขึ้น เช่น 5, 10, 30, 50 หรือ 100 ลูกบาศก์เมตร เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ มีความน่าเชื่อถือและนำไปประยุกต์ใช้ในสถานประกอบการได้ดีมากขึ้น

5.2.2 กำหนดรูปแบบการวางกองที่มีความหลากหลาย เช่น กองหลายยอดหลายความชัน กองหลุมยุบตรงกลาง เป็นต้น ค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรของระบบที่พัฒนาขึ้น อาจจะค้นพบค่าความแม่นยำในการประเมินปริมาตรที่แตกต่างกันได้

5.2.3 เปลี่ยนวัสดุตัวอย่างในการสแกนเก็บข้อมูล เพื่อเพิ่มความหลากหลายในการนำไปประยุกต์ใช้งานในสินค้าเทกองประเภทอื่น ๆ เช่น กากอ้อย มันสับมันเส้น ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น ซึ่งทำให้ผู้ประกอบการสินค้าเทกองต่าง ๆ ทราบถึงเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันและนำไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้

5.2.4 พัฒนาระบบวนการในการประเมินน้ำหนักของวัสดุเทกอง ซึ่งเป็นผลลัพธ์สุดท้ายที่ผู้ประกอบการสินค้าเทกองต่างต้องการ เพราะสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการตรวจสอบกับฝ่ายบัญชีได้สะดวกมากขึ้น ลดกระบวนการในการสุ่มเก็บตัวอย่างวัสดุไปวิเคราะห์หาน้ำหนักแยก เพื่อนำมาคำนวณน้ำหนักรวมทั้งหมดของกองวัสดุ ซึ่งการประเมินน้ำหนักของวัสดุเทกองประเภทต่าง ๆ มีตัวแปรอื่น ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องมากกว่าการประเมินปริมาณวัสดุเทกองแบบปกติ เช่น ความสูงกองวัสดุ ความหนาแน่นของวัสดุ ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น หากต้องการพัฒนาระบบวนการในการประเมินน้ำหนักของวัสดุเทกอง ควรทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียดและวางแผนระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยให้เพียงพอ

รายการอ้างอิง

- Sowcharoensuk Chaiwat. (2566). วิจัยกรุงศรี. แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2566-68 อุตสาหกรรมข้าว. <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/agriculture/rice/io/io-rice-2023-2025>
- Hugenholtz, C. H., Walker, J., Brown, O., & Myshak, S. (2015). Earthwork volumetrics with an unmanned aerial vehicle and softcopy photogrammetry. *Journal of Surveying Engineering*, 141(1), 06014003.
- Arango, C., & Morales, C. A. (2015). Comparison between multicopter UAV and total station for estimating stockpile volumes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 131-135.
- Raeva, P. L., Filipova, S. L., & Filipov, D. G. (2016). Volume computation of a stockpile—a study case comparing gps and uav measurements in an open pit quarry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 999-1004.
- Pratomo, D. G., Anjasmara, I. M., & Ahmad, F. (2019). Analysis of the volume comparison of 3'S (TS, GNSS and TLS). In *E3S Web of Conferences* (Vol. 94, p. 01014). EDP Sciences.
- Ajayi, O. G., & Ajulo, J. (2021). Investigating the applicability of unmanned aerial vehicles (uav) photogrammetry for the estimation of the volume of stockpiles. *Quaestiones Geographicae*, 40(1), 25-38.
- Luo, Y., Chen, J., Xi, W., Zhao, P., Qiao, X., Deng, X., & Liu, Q. (2016). Analysis of tunnel displacement accuracy with total station. *Measurement*, 83, 29-37.
- Zhu, J., Yang, J., Fan, J., Ai, D., Jiang, Y., Song, H., & Wang, Y. (2018). Accurate measurement of granary stockpile volume based on fast registration of multi-station scans. *Remote sensing letters*, 9(6), 569-577.

- อารยา สยาม รัตน์ กิจ, สมภพ รุ่ง สุภา, & อัจฉรา ภรณ์ เปี่ยม สมบูรณ์. (2021). ขีด ความ สามารถ ในการ รองรับ ทาง นิเวศวิทยา ของ การ ขนส่ง สิ้นค้า เท กอง แห่ง ใน บริเวณ เกาะสีซัง จังหวัด ชลบุรี: ECOLOGICAL CARRYING CAPACITY FOR DRY BULK LOADING AROUND SICHANG ISLAND, CHONBURI PROVINCE. วารสาร วิทยาลัย พาณิชย ศาสตร์ บูรพา ปรัทศน์, 16(1), 1-15.
- Rusu, R. B., & Cousins, S. (2011). 3d is here: Point cloud library (pcl). In 2011 IEEE international conference on robotics and automation (pp. 1-4). IEEE.
- Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2-3), 68-82.
- Mehendale, N., & Neoge, S. (2020). Review on lidar technology. Available at SSRN 3604309.
- Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2007). Hough-transform and extended ransac algorithms for automatic detection of 3d building roof planes from lidar data. In *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007* (Vol. 36, pp. 407-412).
- de Lima, D. P., & Costa, G. H. (2021, August). On the Stockpiles Volume Measurement Using a 2D Scanner. In *2021 5th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)* (pp. 1-5). IEEE.
- Chekole, S. D. (2014). Surveying with GPS, total station and terrestrial laser scanner: a comparative study.
- Chulapong, P. (2018). Volume Estimation of Stock Pile: A Study Case Comparing Estimation Results between Surpac and AutoCAD C3D.
- Gago, R. M., Pereira, M. Y., & Pereira, G. A. (2021). An aerial robotic system for inventory of stockpile warehouses. *Engineering Reports*, 3(9), e12396.
- Kwoczyńska, B. (2021). Determining the volume of soil masses using different measurement techniques. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*.
- Manish, R., Hasheminasab, S. M., Liu, J., Koshan, Y., Mahlberg, J. A., Lin, Y. C., ... & Habib, A. (2022). Image-aided LiDAR mapping platform and data processing strategy for stockpile volume estimation. *Remote Sensing*, 14(1), 231.

- Son, S. W., Kim, D. W., Sung, W. G., & Yu, J. J. (2020). Integrating UAV and TLS approaches for environmental management: A case study of a waste stockpile area. *Remote Sensing*, 12(10), 1615.
- Li, T., Zhang, H., Gao, Z., Chen, Q., & Niu, X. (2018). High-accuracy positioning in urban environments using single-frequency multi-GNSS RTK/MEMS-IMU integration. *Remote sensing*, 10(2), 205.
- Du, M., Li, H., & Roshanianfard, A. (2022). Design and experimental study on an innovative UAV-LiDAR topographic mapping system for precision land levelling. *Drones*, 6(12), 403.
- Amaglo, W. Y. (2021). Volume Calculation Based on LiDAR Data. *กล้องสำรวจศูนย์รังสิต*. (2567). การใช้งานมินิปริซึมกับกล้อง TOTAL STATION. <https://www.กล้องสำรวจศูนย์รังสิต.com/content/29239/การใช้งานมินิปริซึมกับกล้องtotal-station>
- Quintero, M.S., Alonzo A. and Scot R. (2008). Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning Training material based on practical applications, version 4
- Filkin, T., Sliusar, N., Huber-Humer, M., Ritzkowski, M., & Korotaev, V. (2022). Estimation of dump and landfill waste volumes using unmanned aerial systems. *Waste Management*, 139, 301-308.
- Alsayed, A., & Nabawy, M. R. (2023). Stockpile Volume Estimation in Open and Confined Environments: A Review. *Drones*, 7(8), 537.
- จิร ธรรม คุณ, & ชีร พล. (2018). การประยุกต์ใช้ภาพถ่ายทางอากาศ และ กลุ่ม จุด สาม มิติ ในการวางแผนวิธีก่อสร้าง: กรณีศึกษา โครงการก่อสร้างทางยก ระดับ.
- Durrant-Whyte, H., & Bailey, T. (2006). Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE robotics & automation magazine*, 13(2), 99-110.
- Chen, W., Shang, G., Ji, A., Zhou, C., Wang, X., Xu, C., ... & Hu, K. (2022). An overview on visual slam: From tradition to semantic. *Remote Sensing*, 14(13), 3010.
- Mehendale, N., & Neoge, S. (2020). Review on lidar technology. Available at SSRN 3604309.
- Shamim, S., & Jafri, S. R. U. N. (2023). A Comparative Study of Multiple 2D Laser Scanners for Outdoor Measurements. *Engineering Proceedings*, 32(1), 16.

- Van Nam, D., & Gon-Woo, K. (2021). Solid-state LiDAR based-SLAM: A concise review and application. In 2021 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp) (pp. 302-305). IEEE.
- Brazeal, R. G., Wilkinson, B. E., & Hochmair, H. H. (2021). A rigorous observation model for the risley prism-based livox mid-40 lidar sensor. *Sensors*, 21(14), 4722.
- GeoSLAM. (2024). Stockpile Volumes: Laser Technology & Software for Mining. <https://geoslam.com/solutions/stockpile-volumes/>
- Hovermap. (2024). S.T. <https://www.emesent.com/hovermap-st/>
- Flyability. (2024). Elios 3-Digitizing the Inaccessible. <https://www.flyability.com/elios-3>
- ABB. (2024). VM3D 3D Volumetric Laser Scanner System. <https://new.abb.com/th/products-services/ABBMeasurementandAnalytics/vm3d-3d-volumetric-laser-scanner-system>
- BinMaster. (2024). 3DlevelScanner. <https://www.binmaster.com/products/product/3dlevelscanner>
- Yang, X., Huang, Y., & Zhang, Q. (2020). Automatic stockpile extraction and measurement using 3D point cloud and multi-scale directional curvature. *Remote Sensing*, 12(6), 960.
- Urbančič, T., Grahor, V., & Koler, B. (2015). Impact Of The Grid Cell Size And Interpolation Methods On Earthwork Volume Calculation. *Geod. Vestn.*, 59(02), 231-245.
- Equator. (2024). What is a Civil 3D surface (TIN versus Grid)?. <https://equatorstudios.com/what-is-a-civil-3d-surface-tin-versus-grid/>
- Trimble. (2024). Trimble RealWorks. <https://geospatial.trimble.com/en/products/software/trimble-realworks>
- Atlas. (2024). Atlas DMT. <http://www.atlasltd.cz/atlas-dmt.html>
- Leica. (2024). Leica cyclone. <https://leicageosystems.com/products/laserscanners/software/leica-cyclone>
- Stroner, M., Kremen, T., Braun, J., Urban, R., Blistan, P., & Kovanic, L. (2019). Comparison of 2.5 D volume calculation methods and software solutions using point clouds scanned before and after mining. *Acta Montan. Slovaca*, 24(11).

- CloudCompare. (2024). 3D point cloud and mesh processing software Open Source Project. <https://www.cloudcompare.org/>
- Alsayed, A., Nabawy, M. R., Yunusa-Kaltungo, A., Quinn, M. K., & Arvin, F. (2021). An autonomous mapping approach for confined spaces using flying robots. In *Towards Autonomous Robotic Systems: 22nd Annual Conference, TAROS 2021, Lincoln, UK, September 8–10, 2021, Proceedings 22* (pp. 326-336). Springer International Publishing.
- Alsayed, A., Nabawy, M. R., Yunusa-Kaltungo, A., Quinn, M. K., & Arvin, F. (2022). Real-time scan matching for indoor mapping with a drone. In *AIAA SCITECH 2022 Forum* (p. 0268).
- Kumar, C., Mathur, Y., & Jannesari, A. (2022, May). Efficient volume estimation for dynamic environments using deep learning on the edge. In *2022 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)* (pp. 995-1002). IEEE.
- Alsayed, A., & Nabawy, M. R. (2022). Indoor stockpile reconstruction using drone-borne actuated single-point lidars. *Drones*, 6(12), 386.
- Mahlberg, J. A., Manish, R., Koshan, Y., Joseph, M., Liu, J., Wells, T., & Bullock, D. M. (2022). Salt stockpile inventory management using LiDAR volumetric measurements. *Remote Sensing*, 14(19), 4802.
- Zhang, X., Ou, J., Yuan, Y., Shang, Y., & Yu, Q. (2011). Projection-aided videometric method for shape measurement of large-scale bulk material stockpile. *Applied Optics*, 50(26), 5178-5184.
- Zhao, S., Lu, T. F., Koch, B., & Hurdsmann, A. (2012, December). Stockpile modelling using mobile laser scanner for quality grade control in stockpile management. In *2012 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)* (pp. 811-816). IEEE.
- Xu, Z., Lu, X., Xu, E., & Xia, L. (2022). A Sliding System Based on Single-Pulse Scanner and Rangefinder for Pile Inventory. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 1-5.



ภาคผนวก ก

ตารางเก็บข้อมูลผลการทดลอง

การทดลองที่ 1

ตารางเก็บข้อมูลผลการทดลองการประเมินปริมาตรวัสดุ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่มุมสแกน 0 องศา

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
00d02cmeps01	1.390	37,910.00
00d02cmeps02	1.350	24,355.00
00d02cmeps03	1.420	26,989.00
Average 0 degree, 2 cm/s	1.387	29,751.333
00d05cmeps01	1.450	19,108.00
00d05cmeps02	1.520	30,409.00
00d05cmeps03	1.530	32,992.00
Average 0 degree, 5 cm/s	1.500	27,503.000
00d10cmeps01	1.500	18,240.00
00d10cmeps02	1.470	19,621.00
00d10cmeps03	1.510	28,947.00
Average 0 degree, 10 cm/s	1.493	22,269.333
00d15cmeps01	1.520	14,639.00
00d15cmeps02	1.480	11,925.00
00d15cmeps03	1.460	10,331.00
Average 0 degree, 15 cm/s	1.487	12,298.333
00d20cmeps01	1.420	10,013.00
00d20cmeps02	1.470	12,494.00
00d20cmeps03	1.350	7,403.00
Average 0 degree, 20 cm/s	1.413	9,970.000
00d25cmeps01	1.290	5,129.00

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
00d25cmps02	1.330	4,765.00
00d25cmps03	1.330	4,728.00
Average 0 degree, 25 cm/s	1.317	4,874.000
00d30cmps01	1.290	3,963.00
00d30cmps02	1.330	4,243.00
00d30cmps03	1.330	4,482.00
Average 0 degree, 30 cm/s	1.317	4,229.333

ตารางเก็บข้อมูลผลการทดลองการประเมินปริมาตรวัสดุ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่มุมสแกน 45 องศา

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
45d02cmps01	0.480	2,000,000.00
45d02cmps02	0.560	1,998,982.00
45d02cmps03	0.510	1,998,110.00
Average 45 degree, 2 cm/s	0.517	1,999,030.667
45d05cmps01	0.470	2,000,311.00
45d05cmps02	0.610	1,998,692.00
45d05cmps03	0.570	1,998,129.00
Average 45 degree, 5 cm/s	0.550	1,999,044.000
45d10cmps01	0.570	1,999,437.00
45d10cmps02	0.470	1,916,725.00
45d10cmps03	0.480	1,878,557.00
Average 45 degree, 10 cm/s	0.507	1,931,573.000
45d15cmps01	0.660	1,417,563.00

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
45d15cmps02	0.670	1,512,644.00
45d15cmps03	0.670	1,429,418.00
Average 45 degree, 15 cm/s	0.667	1,453,208.333
45d20cmps01	0.850	1,168,054.00
45d20cmps02	0.810	1,275,051.00
45d20cmps03	0.770	1,296,769.00
Average 45 degree, 20 cm/s	0.810	1,246,624.667
45d25cmps01	0.870	933,604.00
45d25cmps02	0.900	815,625.00
45d25cmps03	0.900	1,023,641.00
Average 45 degree, 25 cm/s	0.890	924,290.000
45d30cmps01	0.980	770,920.00
45d30cmps02	0.870	790,446.00
45d30cmps03	0.890	728,187.00
Average 45 degree, 30. cm/s	0.913	763,184.333

ตารางเก็บข้อมูลผลการทดลองการประเมินปริมาตรวัสดุ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่มุมสแกน 90 องศา

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
90d02cmps01	0.830	1,219,114.00
90d02cmps02	0.770	1,302,634.00
90d02cmps03	0.600	1,840,061.00
Average 90 degree, 2 cm/s	0.733	1,453,936.333
90d05cmps01	0.790	1,143,762.00

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
90d05cmpps02	0.760	1,137,606.00
90d05cmpps03	0.760	1,098,074.00
Average 90 degree, 5 cm/s	0.770	1,126,480.667
90d10cmpps01	0.870	768,908.00
90d10cmpps02	0.860	705,015.00
90d10cmpps03	0.980	741,998.00
Average 90 degree, 10 cm/s	0.903	738,640.333
90d15cmpps01	0.870	585,114.00
90d15cmpps02	0.960	592,012.00
90d15cmpps03	1.000	581,118.00
Average 90 degree, 15 cm/s	0.943	586,081.333
90d20cmpps01	0.950	529,248.00
90d20cmpps02	0.970	428,264.00
90d20cmpps03	0.990	415,330.00
Average 90 degree, 20 cm/s	0.970	457,614.000
90d25cmpps01	1.010	336,483.00
90d25cmpps02	1.060	340,401.00
90d25cmpps03	1.060	324,019.00
Average 90 degree, 25 cm/s	1.043	333,634.333
90d30cmpps01	1.060	270,843.00
90d30cmpps02	1.070	294,460.00
90d30cmpps03	1.010	281,574.00
Average 90 degree, 30 cm/s	1.047	282,292.333

การทดลองที่ 2

ตารางเก็บข้อมูลผลการทดลองการประเมินปริมาตรวัสดุ 5 ลูกบาศก์เมตร ที่มุมสแกน 0 องศา

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
00d02cmeps01	4.442	895,439.00
00d02cmeps02	4.496	821,921.00
00d02cmeps03	4.469	918,912.00
Average 0 degree, 2 cm/s	4.469	878,757.333
00d05cmeps01	4.864	445,340.00
00d05cmeps02	4.856	414,826.00
00d05cmeps03	4.900	416,665.00
Average 0 degree, 5 cm/s	4.873	425,610.333
00d10cmeps01	4.933	286,489.00
00d10cmeps02	4.968	298,005.00
00d10cmeps03	4.967	295,426.00
Average 0 degree, 10 cm/s	4.956	293,306.667
00d15cmeps01	4.851	224,243.00
00d15cmeps02	4.875	240,212.00
00d15cmeps03	4.974	226,084.00
Average 0 degree, 15 cm/s	4.900	230,179.667
00d20cmeps01	5.038	190,926.00
00d20cmeps02	5.02	186,155.00
00d20cmeps03	5.052	186,087.00
Average 0 degree, 20 cm/s	5.037	187,722.667
00d25cmeps01	4.951	189,461.00

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
00d25cmps02	5.032	154,089.00
00d25cmps03	5.025	161,608.00
Average 0 degree, 25 cm/s	5.003	168,386.000
00d30cmps01	4.825	336,085.00
00d30cmps02	5.004	129,764.00
00d30cmps03	4.994	138,103.00
Average 0 degree, 30 cm/s	4.941	201,317.333

ตารางเก็บข้อมูลผลการทดลองการประเมินปริมาตรวัสดุ 5 ลูกบาศก์เมตร ที่มุมสแกน 45 องศา

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
45d02cmps01	1.094	9,112,673.00
45d02cmps02	1.629	9,248,248.00
45d02cmps03	1.558	9,284,244.00
Average 45 degree, 2 cm/s	1.427	9,215,055.000
45d05cmps01	2.089	5,127,039.00
45d05cmps02	2.023	5,196,041.00
45d05cmps03	2.517	5,110,502.00
Average 45 degree, 5 cm/s	2.210	5,144,527.333
45d10cmps01	2.91	3,176,102.00
45d10cmps02	2.891	3,266,047.00
45d10cmps03	2.957	3,139,509.00
Average 45 degree, 10 cm/s	2.919	3,193,886.000
45d15cmps01	3.344	2,393,515.00

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
45d15cmeps02	3.336	2,434,171.00
45d15cmeps03	3.279	2,490,931.00
Average 45 degree, 15 cm/s	3.320	2,439,539.000
45d20cmeps01	3.562	2,070,869.00
45d20cmeps02	3.569	2,019,598.00
45d20cmeps03	3.549	1,997,316.00
Average 45 degree, 20 cm/s	3.560	2,029,261.000
45d25cmeps01	3.857	1,615,078.00
45d25cmeps02	3.832	1,629,413.00
45d25cmeps03	3.768	1,635,690.00
Average 45 degree, 25 cm/s	3.819	1,626,727.000
45d30cmeps01	3.864	1,535,347.00
45d30cmeps02	3.994	1,394,221.00
45d30cmeps03	4.04	1,361,239.00
Average 45 degree, 30 cm/s	3.966	1,430,269.000

ตารางเก็บข้อมูลผลการทดลองการประเมินปริมาตรวัสดุ 5 ลูกบาศก์เมตร ที่มุมสแกน 90 องศา

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
90d02cmeps01	3.127	7,599,875.00
90d02cmeps02	2.873	6,350,573.00
90d02cmeps03	3.357	5,928,917.00
Average 90 degree, 2 cm/s	3.119	6,626,455.000
90d05cmeps01	3.545	3,747,839.00

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
90d05cmpps02	3.783	4,116,288.00
90d05cmpps03	3.515	3,514,379.00
Average 90 degree, 5 cm/s	3.614	3,792,835.333
90d10cmpps01	4.226	2,269,035.00
90d10cmpps02	4.382	2,513,171.00
90d10cmpps03	4.264	2,256,502.00
Average 90 degree, 10 cm/s	4.291	2,346,236.000
90d15cmpps01	4.377	1,949,806.00
90d15cmpps02	4.228	1,880,642.00
90d15cmpps03	4.468	2,035,322.00
Average 90 degree, 15 cm/s	4.358	1,955,256.667
90d20cmpps01	4.362	1,855,699.00
90d20cmpps02	4.45	1,714,300.00
90d20cmpps03	4.573	1,745,050.00
Average 90 degree, 20 cm/s	4.462	1,771,683.000
90d25cmpps01	4.515	1,279,457.00
90d25cmpps02	4.647	1,267,202.00
90d25cmpps03	4.594	1,339,105.00
Average 90 degree, 25 cm/s	4.585	1,295,254.667
90d30cmpps01	4.53	1,020,035.00
90d30cmpps02	4.46	1,269,944.00
90d30cmpps03	5.08	1,275,746.00
Average 90 degree, 30 cm/s	4.690	1,188,575.000

การทดลองที่ 3

ตารางเก็บข้อมูลผลการทดลองการประเมินปริมาตรวัสดุ 10 ลูกบาศก์เมตร ที่มุมสแกน 0 องศา

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
00d02cmeps01	8.491	1,393,060.00
00d02cmeps02	8.489	1,443,496.00
00d02cmeps03	9.139	1,284,937.00
Average 0 degree, 2 cm/s	8.706	1,373,831.000
00d05cmeps01	9.094	752,227.00
00d05cmeps02	8.953	772,476.00
00d05cmeps03	8.985	776,337.00
Average 0 degree, 5 cm/s	9.011	767,013.333
00d10cmeps01	9.280	548,713.00
00d10cmeps02	9.142	553,209.00
00d10cmeps03	9.023	555,496.00
Average 0 degree, 10 cm/s	9.148	552,472.667
00d15cmeps01	9.368	418,462.00
00d15cmeps02	9.328	433,648.00
00d15cmeps03	9.687	437,064.00
Average 0 degree, 15 cm/s	9.461	429,724.667
00d20cmeps01	9.247	338,654.00
00d20cmeps02	9.285	343,442.00
00d20cmeps03	9.31	340,895.00
Average 0 degree, 20 cm/s	9.281	340,997.000
00d25cmeps01	9.764	290,751.00

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
00d25cmps02	9.536	283,187.00
00d25cmps03	9.375	286,940.00
Average 0 degree, 25 cm/s	9.558	286,959.333
00d30cmps01	9.48	253,201.00
00d30cmps02	9.39	270,250.00
00d30cmps03	9.423	234,519.00
Average 0 degree, 30 cm/s	9.431	252,656.667

ตารางเก็บข้อมูลผลการทดลองการประเมินปริมาตรวัสดุ 10 ลูกบาศก์เมตร ที่มุมสแกน 45 องศา

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
45d02cmps01	3.495	10,900,942.00
45d02cmps02	3.683	9,597,342.00
45d02cmps03	3.68	9,929,399.00
Average 45 degree, 2 cm/s	3.619	10,142,561.000
45d05cmps01	4.95	6,707,097.00
45d05cmps02	5.064	6,656,221.00
45d05cmps03	4.871	6,983,211.00
Average 45 degree, 5 cm/s	4.962	6,782,176.333
45d10cmps01	6.3	4,355,060.00
45d10cmps02	6.268	4,333,500.00
45d10cmps03	6.261	4,400,318.00
Average 45 degree, 10 cm/s	6.276	4,362,959.333
45d15cmps01	6.93	3,417,365.00

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
45d15cmeps02	6.858	3,378,068.00
45d15cmeps03	6.85	3,397,631.00
Average 45 degree, 15 cm/s	6.879	3,397,688.000
45d20cmeps01	7.379	2,707,988.00
45d20cmeps02	7.334	2,702,309.00
45d20cmeps03	7.392	2,682,373.00
Average 45 degree, 20 cm/s	7.368	2,697,556.667
45d25cmeps01	7.833	2,156,761.00
45d25cmeps02	7.74	2,162,942.00
45d25cmeps03	7.81	2,172,207.00
Average 45 degree, 25 cm/s	7.794	2,163,970.000
45d30cmeps01	7.994	1,933,299.00
45d30cmeps02	7.974	2,081,909.00
45d30cmeps03	8.02	1,868,032.00
Average 45 degree, 30 cm/s	7.996	1,961,080.000

ตารางเก็บข้อมูลผลการทดลองการประเมินปริมาตรวัสดุ 10 ลูกบาศก์เมตร ที่มุมสแกน 90 องศา

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
90d02cmeps01	4.673	11,395,884.00
90d02cmeps02	5.14	9,380,873.00
90d02cmeps03	3.68	9,402,943.00
Average 90 degree, 2 cm/s	4.498	10,059,900.000
90d05cmeps01	7.812	4,746,400.00

File name	Estimated Volume (m ³)	Amount of PointClouds
90d05cmpps02	6.52	6,535,397.00
90d05cmpps03	6.084	6,935,495.00
Average 90 degree, 5 cm/s	6.805	6,072,430.667
90d10cmpps01	7.62	5,648,752.00
90d10cmpps02	7.856	3,840,606.00
90d10cmpps03	6.654	5,394,278.00
Average 90 degree, 10 cm/s	7.377	4,961,212.000
90d15cmpps01	7.708	3,586,709.00
90d15cmpps02	7.885	2,797,360.00
90d15cmpps03	7.746	3,130,179.00
Average 90 degree, 15 cm/s	7.780	3,171,416.000
90d20cmpps01	8.377	2,909,747.00
90d20cmpps02	8.207	2,899,692.00
90d20cmpps03	8.428	2,862,356.00
Average 90 degree, 20 cm/s	8.337	2,890,598.333
90d25cmpps01	8.252	2,076,090.00
90d25cmpps02	8.116	2,418,430.00
90d25cmpps03	8.587	2,186,130.00
Average 90 degree, 25 cm/s	8.318	2,226,883.333
90d30cmpps01	8.484	2,044,228.00
90d30cmpps02	8.257	2,112,460.00
90d30cmpps03	8.378	1,934,373.00
Average 90 degree, 30 cm/s	8.373	2,030,353.667



ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการเผยแพร่ระหว่างการศึกษา

Chirananchai Sritap, Paphakorn Pitayachaval and Suradet Tantrairatn. (2024).
DEVELOPMENT OF A BULK MATERIAL VOLUME ESTIMATION SYSTEM USING
AUTOMATIC MOVING RAIL LIDAR TECHNOLOGY. 2nd International
Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA'24), Liverpool,
April 26-28, 2024.



INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS AND NEW APPLICATIONS

<https://proceedings.icsna.org/>2nd International Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA'24), Liverpool, April 26-28, 2024.

Development of a bulk material volume estimation system using automatic moving rail LiDAR technology

Chirananchai Sritap¹, Paphakorn Pitayachaval², Suradet Tantrairatn³

¹*School of Industrial Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand. m6501105@g.sut.ac.th, ORCID: 0009-0005-3126-2737*

²*School of Industrial Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand. paphakorn@g.sut.ac.th, ORCID: 0009-0001-5669-7850*

³*School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand. suradetj@sut.ac.th, ORCID: 0000-0003-1309-8601*

Abstract— This paper focuses on developing a bulk material volume estimation system employing automatic moving rail optical distance measuring technology. The research objective is to devise a system capable of estimating warehouse bulk material volumes utilizing point cloud data. Additionally, the research proposes guidelines for enhancing efficiency in bulk material volume estimation processes. A prototype system was developed and tested using dry rice husk with a humidity level of 15% as the sample material. The testing environment comprised a laboratory with dimensions of 36 square meters and a height of 3 meters, wherein the sample material was arranged in a cone shape with a volume of 1 cubic meter. The system was designed to test with movement speed range from 2 to 30 centimetres per second, and the scanning angles of 0, 45, and 90 degrees. Statistical principles were applied to analyze the collected data, determining averages, and comparing results with actual data to assess accuracy and precision in volumetric measurements. Furthermore, the research evaluated the advantages and disadvantages of alternative tools for bulk material volume estimation in comparison to the developed system, considering factors such as data collection duration, operational costs, and safety measures. Experimental results revealed that at a scanning angle of 90 degrees and a moving speed of 20 centimeters per second achieve a volumetric data accuracy of 97%.

Keywords— Bulk material, Volume estimation, LiDAR technology, Point cloud data

I. INTRODUCTION

Large rice mills commonly utilize bulk warehouses for storing paddy, favouring this method over packing bags due to

risks associated with bag overlap and breakage. In the context of inventory management within warehouses, basic estimation methods involve tracking weight or volume, often facilitated by tools such as truck scales [1]. However, these methods may be susceptible to errors stemming from internal factors like pest infestation or spoilage. Modern technology has increasingly become pivotal in enhancing the accuracy of material quantity assessments in warehouses. Tools like integrated cameras and unmanned aerial vehicles (UAVs) have emerged as popular choices due to their ability to measure with millimeter-level precision [2]. However, integrated camera surveys are time-consuming and impractical for complex bulk cargo shapes, while UAVs are more suitable for outdoor environments requiring GNSS systems for signal reception from satellites [3]. Ground-based laser scanners offer higher-quality data and versatility for both indoor and outdoor applications, yet they are often criticized for being time-consuming and unsafe [3]. This paper seeks to address the limitations of existing data collection methods by employing automatic moving rail LiDAR technology, aimed at swiftly and safely capturing bulk cargo data. Through a comprehensive literature review, this study identifies gaps in bulk product quantity assessment systems and proposes the utilization of automatic moving rail LiDAR technology as a solution. The research methodology encompasses the design and testing of key components, utilizing sample materials of known volume to evaluate the efficiency and efficacy of the developed system. By enhancing the potential for managing bulk warehouses, particularly in rice mills, this research endeavors to empower operators with

improved inventory management capabilities and operational efficiency.

II. RELATED WORK

Estimating the volume of bulk materials within warehouse environments presents distinct challenges compared to outdoor storage assessments, such as poorly lit areas, unreliable satellite signals, or hazardous substances, which have resulted in comparatively less research in this domain. A literature review of this area encompasses an examination of technologies employed for volume estimation of bulk materials within warehouses, categorized into three main types: drones operating indoors, rail systems, and stand-mounted systems [4].

A. Using Drones Inside Buildings

Multi-rotor drones have been developed to facilitate volume estimation of bulk materials within warehouses, alleviating the workload of personnel and capable of autonomous operation. Kumar et al. [5] devised an algorithm employing stereo depth cameras and deep learning to estimate bulk material volumes within aerial warehouses, independent of GPS signals. However, this method is constrained to smaller bulk material piles due to the necessity of comprehensive material pile detection for volume estimation, with estimation errors escalating from 1% to 9.8% for volumes six times the original. In a separate endeavor, Gago et al. [6] introduced a quantitative estimation technique utilizing a DJI quadcopter drone, model Matrice 100, equipped with a Velodyne 3D LiDAR, model VLP 16 Puck Lite, for navigation and mapping within warehouses. By leveraging warehouse walls or ceilings as reference points for autonomous flight, they employed an offline mapping approach to construct a 3D model of the warehouse, achieving volumetric accuracies of 98.5% and 97.8% in simulation and real-world tests, respectively.

Alsayed et al. [7,8] proposed an efficient scan-matching approach for drone mapping based on an iterative closest point (ICP) algorithm suitable for low-density LiDAR scanning, facilitating real-time 3D map creation and route planning within warehouses. Despite being tested solely through simulations, their method demonstrated 97% accuracy in estimating material volumes within mapped warehouses. Innovatively, Alsayed and Nabawy [9] advocated a warehouse scanning method employing a single-point LiDAR sensor operated by a micro servo motor, outperforming traditional 2D and 3D LiDAR systems in terms of scanning speed, weight, and cost efficiency. In a related study, Alsayed et al. [10] investigated the control of an autonomous multi-drone model employing 1D LiDAR sensors for warehouse mapping, comparing the cost-effectiveness of multiple low-cost sensors versus a single advanced laser scanner (2D/3D LiDAR) through simulations. Results indicated that increasing the number of drones up to five enhanced volume estimation accuracy, rivalling sophisticated LiDAR scanners at significantly reduced costs. However, practical implementation necessitates a data interpretation system for accurate drone localization and orientation during mapping operations.

B. Rail System

Rail systems represent a viable approach for estimating the quantity of bulk materials within warehouses, typically comprising a sliding rail system installed above the warehouse space. Zhao et al. [11] investigated the utilization of a 2D LiDAR scanner (Sick LMS200) mounted on a rail above the warehouse. The LiDAR measures the X and Y directions, while a laser distance meter gauges the distance travelled in the Z direction. Experimental findings revealed volume estimation accuracy ranging between 96.2% and 99.4%. Similarly, Xu et al. [12] developed a comparable system employing two LiDAR scanners and compared volume values with the GeoSLAM scanner, achieving a volume estimation accuracy of up to 99%. Moreover, the developed system boasted a remarkable speed, being 35 times faster than the GeoSLAM scanner.

Daofang Chang et al. [13] proposed a methodology utilizing 3D LiDAR to estimate bulk material volumes within warehouses. Mounted on the arm of a stacker reclaimer and moving along a rail, the 3D LiDAR scans the surface of warehouse stacks. Although tested in real environments, the accuracy of volumetric data estimation remains unverified. Similarly, Zhang et al. [14] explored a vision-laser system for estimating bulk material volumes within warehouses. This system utilizes a camera to capture laser lines on the vertical material surfaces of warehouse sections, mounted on rails. Although the accuracy of all volume estimates was not verified, the vertical scanning accuracy reached approximately 99%, making it a potentially widely utilized method. However, a primary limitation arises in dark and dusty environments, where removing sensor devices for cleaning and maintenance proves challenging.

C. Stand-Mounted System

For estimating bulk material quantities within warehouses, LiDAR sensors can be mounted on tripods or beams. Mahlberg et al. [15] developed the SMART (Stockpile Management and Reporting Technology) system, incorporating two 3D LiDAR sensors and a GoPro camera mounted on a tripod. The system enables manual rotation for scanning and data collection, with the option of ceiling mounting to expand the scanning field of view, achieving a volume estimation accuracy exceeding 99.9% compared to data obtained with TLS scanners. This system has been deployed in over 30 factories. Additionally, Liu et al. [16] enhanced the SMART system's data collection process and conducted tests within domes, utilizing scan matching techniques to improve bulk material volume estimation accuracy.

Another study by Lima and Costa [17] devised a volume estimation system featuring a 2D LiDAR mounted on a tripod to scan data vertically for estimating the volume of conical bulk materials. The accuracy of volume estimation increases with pile size, although this method applies solely to single conical bulk materials and may not suit complex cone-shaped piles. Tripod-mounted LiDAR scanners have demonstrated efficient volume estimation in warehouses; however, to enhance data collection coverage, relocating the tripod to multiple positions

within confined spaces is often necessary, posing potential risks to operators in many scenarios.

III. AUTOMATIC MOVING RAIL SYSTEM

The Automatic Moving Rail System functions as a data scanning apparatus employing solid-state optical distance sensors to estimate the volume of bulk materials stored in warehouses. It comprises a singular solid-state LiDAR unit and a compact computer dedicated to controlling and storing scanning data from the LiDAR sensors. Enclosed within a single housing, as shown in Figure 1. All components operate on an 18V lithium-ion battery provided with the kit, facilitating motor-driven movement along rails.

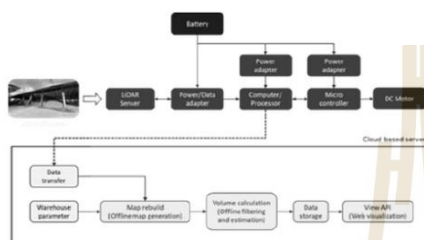


Fig. 1 Components and working flow of the system.

A. Components

Utilizing LiDAR technology, the system employs Livox brand solid-state LiDAR, featuring a scanning field of view with a non-repetitive pattern of 70.4 degrees horizontally and 77.2 degrees vertically. Capable of capturing 240,000-point clouds per second in single-backward mode, it weighs 0.498 kg and incorporates a built-in processor, as shown in Table 1.

TABLE I
TABLE OF THE CHARACTERISTICS OF THE LIVOX AVIA BRAND LIDAR SOLID-STATE SENSOR.

Laser Wavelength	905 nm
Laser Safety	Class 1(IEC 60825-1:2014) (safe for eyes)
Detection Range (@100 klx)	190 m @10% reflectivity
	230 m @20% reflectivity
	320 m @80% reflectivity
Detection Range (@0 klx)	190 m @10% reflectivity
	260 m @20% reflectivity
	450 m @80% reflectivity
FOV	Non-repetitive scanning pattern: 70.4° (horizontal) × 77.2° (vertical)
	Repetitive scanning pattern: 70.4° (horizontal) × 4.5° (vertical)
Distance Random Error	1σ (@ 20 m) < 2 cm
Angular Random Error	1σ < 0.05°

Beam Divergence	0.03° (Horizontal) × 0.28° (Vertical)
Point Rate	240,000 points/s (first or strongest return)
	480,000 points/s (dual return)
	720,000 points/s (triple return)
Data Latency	≤ 2 ms
IMU	Built-in IMU model: BMI088
Weight	Approx. 498 g (without cables)

Operation of the system is commanded by a single computer, wired to a computer module for the storage of point cloud data retrieved from LiDAR sensors. Additionally, remote operation is facilitated through another computer, specifically, the Intel NUC Gen 11 brand, equipped with an Intel® Core™ i7-1165G7 central processing unit and 16 GB DDR4-3200 temporary memory, all powered by 18V lithium-ion batteries. Housed within a 35 x 40-centimeter aluminium box standing 35 centimeters tall, the assembly enables easy mounting onto the rail drive unit.

The Automatic Moving Rail System is engineered to traverse a 1-inch rail, capable of supporting a maximum weight of 30 kilograms while offering adjustable speeds ranging from 0 to 30 centimeters per second. Comprising two sets of rail wheels to bear the vertical force exerted by the LiDAR box and a set of high-torque motors to propel the wheels forward along the rail, the system incorporates various accessories, including warning lights to indicate operational status, a movement direction switch button, and limit switches to cease operations upon cycle completion. Furthermore, a Quick assembly rail system is devised to facilitate the installation and maintenance of equipment within the LiDAR box, as shown in Figure 2.



Fig. 2 Automatic moving rail system.

B. Experimental

The experiments were conducted at the university lab. The developed system underwent testing using dry rice husk as the sample material, with a humidity level of 15%, within a laboratory measuring 36 square meters and standing 3 meters tall. Movement speeds ranged from 2 to 30 centimeters per second while scanning angles of 0, 45, and 90 degrees were employed to assess the cone-shaped bulking behavior of the sample material. The sample volume amounted to 1 cubic meter, verified for accuracy using a FARO focus (TLS), a mapping system equipped with a high-precision distance sensor [18], as shown in Figure 3.



Fig. 3 Verified for accuracy using a FARO focus.

C. Data Collection Strategy

Data collection techniques at 0 and 45-degree scanning angles enabled the acquisition of complete sample pile data, revealing surface characteristics of the material piles. LiDAR sensors excel in gathering information across various environments, aiding in self-referencing their position. However, data collection at a 90-degree scanning angle poses challenges due to the sensor's narrow viewing angle, resulting in inaccurate position referencing. Consequently, complete sample material data cannot be collected directly. To address this, researchers created a simulated environment to assist the LiDAR sensor algorithm in self-referencing its position during data collection, as shown in Figure 4.

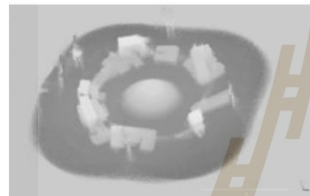


Fig. 4 Creating a simulation environment in the data scanning view.

IV. VOLUME ESTIMATION

D. System Calibration

System accuracy calibration involves collecting data on groups of three-dimensional data points from a material sample of known size. This process allows for the adjustment of instrument accuracy. The sample material used for accuracy calibration is a cube-shaped sample with a volume of 1 cubic meter, as shown in Figure 5, ensuring minimal tool tolerances before its application in research data collection.



Fig. 5 Sample material of known size is used to calibrate accuracy.

E. Surface Reconstruction

Following the scanning of bulk material 3D point groups within a warehouse using the developed tool, raw data is obtained, which has not undergone filtering to remove unwanted elements. To streamline data processing and align with the efficiency of the research equipment, a 3D point group processing algorithm [19] is utilized to reduce data size and flatten surfaces. The Cloud Compare program is employed for data management, initiating the creation of a triangular mesh of the pile surface with voxels. The irregular data shape is voxelized to produce a bottom grid, which is segmented into numerous triangular prisms for enhanced accuracy. Rectangles are diagonally divided using a diagonal line with minimal height differences between two points, ensuring prism proximity to the real surface, as shown in Figure 6.

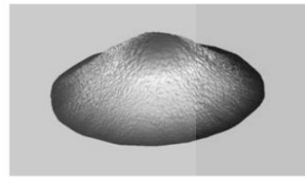


Fig. 6 Creating a 3D prism from point cloud data.

F. Volume Calculation

Upon generating a 3D image of the data, the three-dimensional figure is partitioned into multiple triangular prisms, with each prism's volume (V_i) calculated individually, as shown in Figure 7. The volumes of all prisms are summed to derive the total bulk material volume. This computation encompasses surface points A, B, and C, and designated pile base areas A' , B' , and C' . The volume of a triangular prism is calculated using the formula:

$$V_i = \frac{1}{3} S_{A'B'C'} (Z_a + Z_b + Z_c) \quad (1)$$

Where $S_{A'B'C'}$ represents the area of triangles A' , B' , and C' on the base plane of the material pile [20].

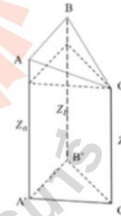


Fig. 7 Calculation of the volume of each prism [20].

G. Precision of Volume (PoV)

The precision of volume calculations is determined by assessing the relative volume of the developed system to the actual volume.

$$\text{PoV} = \left(1 - \frac{|v - \bar{v}|}{v}\right) \times 100\% \quad (2)$$

This assessment compares the actual volume v to the calculated volume \bar{v} of the developed system. The accuracy of volume estimation is directly proportional to the accuracy of the developed system [20].

V. RESULTS AND DISCUSSION

Results of experiments evaluating the volume of bulk materials in warehouses revealed that conical sample materials with a known volume of 1 cubic meter were scanned at viewing angles of 0, 45, and 90 degrees, and tested at travel speeds ranging from 2 to 30 centimeters per second. The Cloud Compare program was employed to manage point cloud data and assess volume. The highest volume estimation accuracy, 97%, was achieved at a scanning angle of 90 degrees and a system movement speed of 20 cm/s. Conversely, at a scanning angle of 0 degrees, the best volume estimation accuracy reached 68% at a speed of 30 cm/s, while at a 45-degree scanning angle, accuracy peaked at 91%, also at a speed of 30 cm/s. Therefore, it can be inferred that volume estimation accuracy tends to increase at scanning angles of 0 and 45 degrees as the system's movement speed rises, as shown in Table 2.

TABLE II
EXPERIMENTAL RESULTS COLLECTION TABLE SAMPLE MATERIAL WITH A VOLUME EQUAL TO 1 CUBIC METER

Sensor angle (degree)	Speed (m/s)	Estimated volume (m ³)				Accuracy (%)
		1 st	2 nd	3 rd	Average	
0	0.02	1.39	1.35	1.42	1.387	61
	0.05	1.45	1.52	1.53	1.503	50
	0.10	1.50	1.47	1.51	1.494	51
	0.15	1.52	1.48	1.46	1.489	51
	0.20	1.42	1.47	1.35	1.413	59
	0.25	1.29	1.33	1.33	1.317	68
	0.30	1.29	1.33	1.33	1.315	68
45	0.02	0.48	0.56	0.51	0.516	52
	0.05	0.47	0.61	0.57	0.550	55
	0.10	0.57	0.47	0.48	0.506	51
	0.15	0.66	0.67	0.67	0.670	67
	0.20	0.85	0.81	0.77	0.809	81
	0.25	0.87	0.90	0.90	0.890	89
	0.30	0.98	0.87	0.89	0.914	91
90	0.02	0.83	0.77	0.60	0.736	74
	0.05	0.79	0.76	0.76	0.770	77
	0.10	0.87	0.86	0.98	0.905	90
	0.15	0.87	0.96	1.00	0.941	94
	0.20	0.95	0.97	0.99	0.970	97
	0.25	1.01	1.06	1.06	1.044	96
	0.30	1.06	1.07	1.01	1.045	95

VI. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The bulk material volume estimation system, employing automatic moving rail optical distance measuring technology,

was developed to estimate bulk material volumes in warehouses using point cloud data. The system demonstrated an accuracy of 97%, consistent with the research findings of Zhao et al. [11], which reported volume estimation accuracy ranging from 96.2% to 99.4%. This system can mitigate the limitations associated with traditional bulk product evaluation methods, which are time-consuming and pose risks to operating personnel. Like the findings of Xu et al. [12] The developed system comprises simple equipment, including a small computer for data processing, a solid-state LiDAR sensor, and a battery for power, along with a drive unit on the rails. These components are significantly more cost-effective than existing 3D data acquisition tools, rendering them suitable for many small and medium-sized rice mill operators in Thailand, thereby enhancing bulk warehouse management capabilities.

The experiment primarily concentrated on developing a bulk materials volume estimation system using automatic moving rail optical distance measuring technology, focusing on scanning conical bulk material data at a maximum speed of 30 centimeters per second. However, future research should expand its scope by increasing the known volume of bulk materials to include sizes like 5, 10, 30, 50, or 100 cubic meters, enhancing system reliability and applicability across different workplaces. Additionally, the study suggests examining various pile layouts, including those with multiple peaks and slopes or central sinkhole piles, to account for potential accuracy variations in volume estimation. Moreover, diversifying sample materials during data collection scans, such as sugarcane bagasse, chopped potatoes, or animal feed com, can broaden the technology's applicability and inform bulk product operators about available options for enhancing their businesses.

REFERENCES

- [1] Hugenholz, C.H.; Walker, J.; Brown, O.; Myshak, S. Earthwork Volumetrics with an Unmanned Aerial Vehicle and Softcopy Photogrammetry. *J. Surv. Eng.* 2015, 141, 06014003.
- [2] Luo, Y.; Chen, J.; Xi, W.; Zhao, P.; Qiao, X.; Deng, X.; Liu, Q. Analysis of Tunnel Displacement Accuracy with Total Station. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 2016, 83, 29–37.
- [3] Zhu, J.; Yang, J.; Fan, J.; Danni, A.; Jiang, Y.; Song, H.; Wang, Y. Accurate Measurement of Granary Stockpile Volume Based on Fast Registration of Multi-Station Scans. *Remote Sens. Lett.* 2018, 9, 569–577.
- [4] Alsayed, Ahmad, and Mostafa RA Nabawy. "Stockpile Volume Estimation in Open and Confined Environments: A Review." *Drones* 7 8 (2023): 537.
- [5] Kumar, C.; Mathur, Y.; Jannesari, A. Efficient Volume Estimation for Dynamic Environments Using Deep Learning on the Edge. In *Proceedings of the 2022 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)*, Lyon, France, 30 May–3 June 2022; pp. 995–1002.
- [6] Gago, Reynaldo M., Matheus YA Pereira, and Guilherme AS Pereira. "An aerial robotic system for inventory of stockpile warehouses." *Engineering Reports* 3 9 (2021): e12396.
- [7] Alsayed, Ahmad, et al. "An Autonomous Mapping Approach for Confined Spaces Using Flying Robots." *Towards Autonomous Robotic Systems, 22nd Annual Conference, TAROS 2021*, Lincoln, UK, September 8–10, 2021. *Proceedings 22*. Springer International Publishing, 2021.
- [8] Alsayed, Ahmad, et al. "Real-time scan matching for indoor mapping with a drone." *AIAA SCITECH 2022 Forum*. 2022.

 International Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA'24)

- [9] Alsayed, Ahmad, and Mostafa RA Nabawy. "Indoor stockpile reconstruction using drone-borne actuated single-point lidars." *Drones* 6.12 (2022): 386.
- [10] Alsayed, Ahmad, Mostafa R. Nabawy, and Farshad Arvin. "Autonomous Aerial Mapping using a Swarm of Unmanned Aerial Vehicles." *AIAA AVIATION 2022 Forum*. 2022.
- [11] Zhao, Shi, et al. "Stockpile modelling using mobile laser scanner for quality grade control in stockpile management." 2012 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV). IEEE, 2012.
- [12] Xu, Zhihua, et al. "A Sliding System Based on Single-Pulse Scanner and Rangefinder for Pile Inventory." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 19 (2022): 1-5.
- [13] Chang, Daofang, Houjun Lu, and Weijian Mi. "Bulk terminal stockpile automatic modeling based on 3D scanning technology." 2010 International Conference on Future Information Technology and Management Engineering Vol. 1. IEEE, 2010.
- [14] Zhang, Xiaohu, et al. "Projection-aided videometric method for shape measurement of large-scale bulk material stockpile." *Applied Optics* 50.26 (2011): 5178-5184.
- [15] Mahberg, Justin Anthony, et al. "Salt Stockpile Inventory Management Using LiDAR Volumetric Measurements." *Remote Sensing* 14.19 (2022): 4802.
- [16] Liu, Jijiong, et al. "An image-aided sparse point cloud registration strategy for managing stockpiles in dome storage facilities." *Remote Sensing* 15.2 (2023): 504.
- [17] de Lima, Duan Pelissaro, and Guilherme Holsbach Costa. "On the Stockpiles Volume Measurement Using a 2D Scanner." 2021 5th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT). IEEE, 2021.
- [18] Manish, Raja, et al. "Image-aided LiDAR mapping platform and data processing strategy for stockpile volume estimation." *Remote Sensing* 14.1 (2022): 231.
- [19] Rusu, Radu Bogdan, and Steve Cousins. "3d is here: Point cloud library (pcl)." 2011 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, 2011.
- [20] Yang, Xingyu, Yuchun Huang, and Qulan Zhang. "Automatic stockpile extraction and measurement using 3D point cloud and multi-scale directional curvature." *Remote Sensing* 12.6 (2020): 960.



International Conference on Intelligent
Systems and New Applications

ICISNA'24

CERTIFICATE

OF ATTENDANCE

This is to certify that the paper entitled

**DEVELOPMENT OF A BULK MATERIAL VOLUME ESTIMATION SYSTEM USING
AUTOMATIC MOVING RAIL LIDAR TECHNOLOGY**

was orally presented at the International Conference on Intelligent Systems and New Applications
(ICISNA'24) held in Liverpool, UNITED KINGDOM on April 26-28, 2024.

Author(s) of the paper

CHIRANANCHAI SRITAP, PAPHAKORN PITAYACHAVAL, SURADET TANTRAIRATN



Dr. Karl JONES
General Chair

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายจිරนนท์ชัย ศรีทับ เกิดเมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2542 จบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนจักราชวิทยา อ.จักราช จ.นครราชสีมา ได้รับทุนศึกษาต่อและสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ในหลักสูตรวิศวกรรมอากาศยาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2563 หลังจบการศึกษา ได้เข้าทำงานในบริษัทเอกชนในตำแหน่ง เจ้าหน้าที่พัฒนาธุรกิจและการตลาด จนถึงปัจจุบัน

ในปี พ.ศ.2565 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับทุนการสนับสนุนการศึกษาแก่นักวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งภายนอก เป็นระยะเวลา 2 ปี และขณะศึกษาอยู่ได้มีโอกาสนำเสนอบทความวิชาการจำนวน 1 บทความ คือ

- 1) DEVELOPMENT OF A BULK MATERIAL VOLUME ESTIMATION SYSTEM USING AUTOMATIC MOVING RAIL LIDAR TECHNOLOGY ภายในงาน International Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA'24)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี